CANGUROS ASESINOS • JUEGOS INFINITOS • CUERDAS COSMICAS • ADA Y EL PRIMER ORDENADOR

INVESTIGACION y CIENCIA

JULIO 1999
800 PTA. 4,81 EURO

Edición española de SCIENTIFIC AMERICAN



TSUNAMI

AGUJEROS NEGROS EN LA VIA LACTEA

REGENERACION DE NEURONAS

00274
9 770210 136004



Julio de 1999 Número 274

SECCIONES

SECCIONES



Portada: Heidi Noland

PROCEDENCIA DE LAS ILUSTRACIONES

Página	Fuente
6-8	Slim Films
9	Lisa Burnett; fuente: Martin Elvis
10-11	Slim Films
12	Slim Films; fuente: Jeffrey E. McClintock
13	Lisa Burnett; fuente: Kristin Menou
14-15	Tomo Narashima
16	Linda Kitabayashi, Instituto Salk
17	Tomo Narashima
18	James Aronovsky
19	Lisa Burnett
24-25	Ilustración fotográfica: Jana Brenning; fotografías: Robert Beck y Kathleen Norris Cook
26	Palani Mohahn
27	Laurie Grace
28	Paolo Bosio
29	Jennifer C. Christiansen
30	Kioto News Service (*arriba*), NOAA (*abajo*)
31	Departamento de Geología e Industrias Minerales de Oregón
32	Corbis (*fotografías*), Laurie Grace (*dibujo*)
33	Michele G. Bullock, *NOAA Corps*
46-47	Roberto Osti
48-49	Roberto Osti y Anne Musser
50	Anne Musser (*arriba*), Norman O. Tomalin (*abajo, izquierda*), John Cancalosi (*centro*) y Erwin y Peggy Bauer (*derecha*)
51	Stephen Wroe (*arriba*), Lisa Burnett (*abajo*)
52	Roberto Osti y Anne Musser
54-55	Retrato: cortesía del Museo Británico; Sello: © Oficina de Correos Británica; Fondo: cortesía de la Biblioteca del Museo de Ciencias de Londres
57	Reimpresión de *Scientific Memoirs*; dirigido por Richard Taylor, vol. III, 1843
58	Biblioteca del Museo de Ciencias de Londres
59	Corbis-Bettmann
60	Bourne & Sheperd
61	Madhusree Mukerjee
62-63	Madhusree Mukerjee (*fotografías*), Laurie Grace (*mapa y motivos*), fuente: *The Jarawa*, por Jayanta Sarkar
64-65	Madhusree Mukerjee
66	Sita Venkateswar
68-72	Pour la Science
74-75	Alejandro Gangui y Patrick Peter
76	O. D. Lavrentovich
77	P. Avelino y P. Shellard
78-83	Alejandro Gangui y Patrick Peter
84	Ely Silk
85	Daniels & Daniels
86-87	Bryan Christie
96	George Retseck y Bryan Christie

COLABORADORES DE ESTE NUMERO

Asesoramiento y traducción:

Juan Pedro Campos: *La huella de los agujeros negros*; José M.ª Valderas Martínez: *Regeneración de las células nerviosas en adultos* y *Nexos*; Sònia Ambròs: *Tsunamis*; Joandomènec Ros: *Canguros asesinos y otros marsupiales sanguinarios*; Luis Bou: *Ada y la primera computadora, Juegos infinitos y conjuntos grandes* y *Juegos matemáticos*; José Manuel García de la Mora: *Aborígenes de las islas Andamán*; Angel Garcimartín: *Perfiles*; J. Vilardell: *Hace..., Taller y laboratorio* e *Ideas aplicadas*

INVESTIGACION Y CIENCIA

DIRECTOR GENERAL Francisco Gracia Guillén
EDICIONES José María Valderas, *director*
ADMINISTRACIÓN Pilar Bronchal, *directora*
PRODUCCIÓN M.ª Cruz Iglesias Capón
Bernat Peso Infante
SECRETARÍA Purificación Mayoral Martínez
EDITA Prensa Científica, S. A. Muntaner, 339 pral. 1.ª – 08021 Barcelona (España)
Teléfono 93 414 33 44 Telefax 93 414 54 13

SCIENTIFIC AMERICAN

EDITOR IN CHIEF John Rennie
BOARD OF EDITORS Michelle Press, *Managing Editor*; Philip M. Yam, *News Editor*; Ricki L. Rusting, *Senior Associate Editor*; Timothy M. Beardsley y Gary Stix, *Associate Editors*; W. Wayt Gibbs, *Senior Writer*; Kristin Leutwyler, *On-Line Editor*; Mark Alpert, Carol Ezzell, Alden M. Hayashi, Madhusree Mukerjee, George Musser, Sasha Nemecek y Glenn Zorpette, *Editors;* Marguerite Holloway, Steve Mirsky y Paul Wallich, *Contributing Editors*
PRODUCTION Richard Sasso
CHAIRMAN AND CHIEF EXECUTIVE OFFICER John J. Hanley
CO-CHAIRMAN Rolf Grisebach
PRESIDENT Joachim P. Rosler

SUSCRIPCIONES

Prensa Científica S. A.
Muntaner, 339 pral. 1.ª
08021 Barcelona (España)
Teléfono 93 414 33 44
Fax 93 414 54 13

Precios de suscripción:

	Un año	Dos años
España	8.800 pta. 52,89 euro	16.000 pta. 96,16 euro
Extranjero	11.150 pta. 67,01 euro	20.700 pta. 124,41 euro

Ejemplares sueltos:

Ordinario: 800 pta. 4,81 euro
Extraordinario: 1.000 pta. 6,01 euro

—El precio de los ejemplares atrasados es el mismo que el de los actuales.

DISTRIBUCION

para España:

MIDESA
Aragoneses, 18 (Pol. Ind. Alcobendas)
28108 Alcobendas (Madrid)
Tel. 91 484 39 00

para los restantes países:

Prensa Científica, S. A.
Muntaner, 339 pral. 1.ª – 08021 Barcelona
Teléfono 93 414 33 44

PUBLICIDAD

GM Publicidad
Francisca Martínez Soriano
Menorca, 8, semisótano, centro, izquierda.
28009 Madrid
Tel. 91 409 70 45 – Fax 91 409 70 46

Cataluña y Baleares:
Miguel Munill
Muntaner, 339 pral. 1.ª
08021 Barcelona
Tel. 93 321 21 14
Fax 93 414 54 13



ISSN 0210136X Dep. legal: B. 38.999 – 76

Filmación y fotocromos reproducidos por Dos Digital, Zamora, 46-48, 6ª planta, 3ª puerta - 08005 Barcelona
Imprime Rotocayfo, S.A. Ctra. de Caldes, km 3 - Santa Perpètua de Mogoda (Barcelona)

Printed in Spain - Impreso en España

HACE...

...cincuenta años

TENSIÓN NERVIOSA Y ESQUIZOFRENIA. «La corteza suprarrenal parece estar implicada en la esquizofrenia y quizás en otros estados de salud mental. Una muestra de pacientes esquizofrénicos reveló una sorprendente incapacidad de reacción mediante un aumento de esteroides en pruebas de tensión psíquica, y ello pese a que su secreción normal de esteroide difería muy poco de los niveles medios de la población. Así pues, en los esquizofrénicos la corteza suprarrenal no puede adaptar su actividad a los cambios de situación. Podría ser que deficiencias químicas de esta índole, acaso de origen genético, dejen a ciertas personas más vulnerables ante las tensiones de la vida.»

PAISAJE LUNAR. «La explicación verosímil de los cráteres de la Luna los atribuye a los tremendos impactos de enormes meteoritos. Para sacar una conclusión más definitiva, podemos recurrir al conocimiento acumulado durante la última guerra acerca de los cráteres abiertos en la tierra por bombas de aviación, minas y granadas de artillería. Se evidencia que el único tipo de cráter que se corresponde con los lunares es el sencillo hoyo que se forma por la aplicación de potencia explosiva. Esos hoyos presentan siempre la misma forma general.»

...cien años

FERROCARRILES BAJO TIERRA. «El Túnel del East River forma parte de las extensas ampliaciones contempladas por el Ferrocarril de Long Island. Desde la estación cercana a la Plaza del Ayuntamiento, en Brooklyn, el túnel llegará hasta la actual estación de Flatbush Avenue, por donde pasará a 5,5 metros por debajo del nivel de la calle (*véase ilustración*), y hasta la estación de Franklin Avenue. Los coches que se emplearán en el túnel serán más o menos del mismo tamaño que los del Puente de Brooklyn, de unos 15 metros de largo y con una capacidad para 60 viajeros sentados.»

ENSAYOS DE CASCOS DE BUQUE. «El valor de los experimentos basados en el remolque de modelos a pequeña escala de buques, al objeto de deducir la resistencia de una embarcación a tamaño natural, fue puesto de manifiesto, hacia 1870, por Mr. William Froude. La Agencia de Construcción de nuestro Departamento de la Armada ha terminado un estanque experimental, de más de 140 metros de largo. Se anuncia ahora la finalización y la instalación de las máquinas e instrumentos especiales. Una carro de remolque, accionado por electricidad, transporta el aparato de medida. El aparato dinamométrico se ha diseñado evitando el uso de palancas u otros dispositivos que supongan rozamiento, y aquí también se echa mano de la electricidad. El tambor está dotado con aparatos para registrar tiempos y distancias, mediante los cuales puede determinarse la fuerza de tracción.»



El nuevo tranvía subterráneo de Atlantic Avenue en Brooklyn

ABASTECIMIENTO DE MARFIL. «Es obvio que el marfil africano va a escasear cada vez más. Si no hubiera otra fuente de abastecimiento, este bello material no tardaría en alcanzar precios prohibitivos. Pero en las tundras heladas de Siberia existen reservas que bastan para abastecer el mercado mundial durante muchos años. Ese marfil es producto del mamut (*Elephas primigenius*), una especie emparentada con el elefante indio.»

...ciento cincuenta años

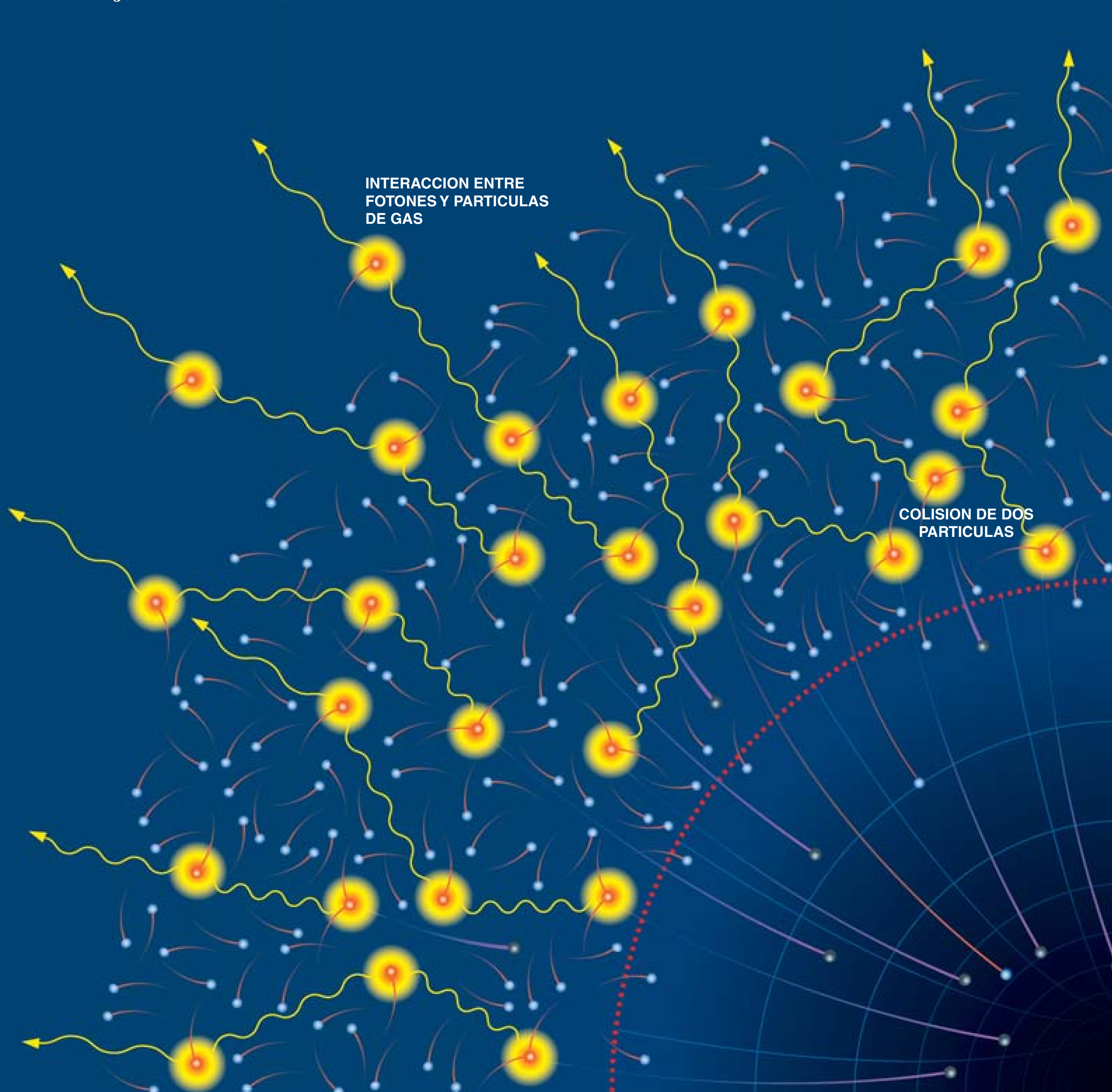
TEMPERAMENTO HUMILDE, MAL OLOR. «Quienes han visitado las regiones montañosas de Siria, Palestina y la Península del Sinaí saben muy bien que el camello resiste igual los ásperos senderos montañosos que las móviles arenas del desierto. Sus plantas endurecidas soportan el fuego de la arena y los cantos afilados. No hay, pues, razones para que el camello no pueda resultar eficaz auxiliar del hombre en las praderas de Texas y en las montañas de México, Nuevo México y California.» [*Nota de la Redacción: En 1855 Jefferson Davis, Secretario de Guerra, fue autorizado a comprar camellos "para usos militares" en un experimento que fracasó*.]

¿ERA DORADA O HIERBA MÁS VERDE? «Hoy es moda, afirma Macaulay, situar la era dorada de Inglaterra en unos tiempos en que hasta los nobles vivían sin unas comodidades cuya carencia sería intolerable para los modernos lacayos. Nosotros también seremos envidiados. Puede que en el siglo XX un campesino de Dorsetshire se considere miserablemente pagado con 15 chelines por semana; que un obrero esté tan poco acostumbrado a cenar sin carne como ahora lo está a comer pan de centeno; que la policía sanitaria y los descubrimientos médicos hayan añadido algunos años a la duración media de la vida humana.»

La huella de los agujeros negros

Hasta hace poco sólo había pruebas circunstanciales de la presencia de agujeros negros. Pero se ha dado ya con un indicio inequívoco: la existencia de volúmenes de espacio donde la energía desaparece sin dejar ni rastro

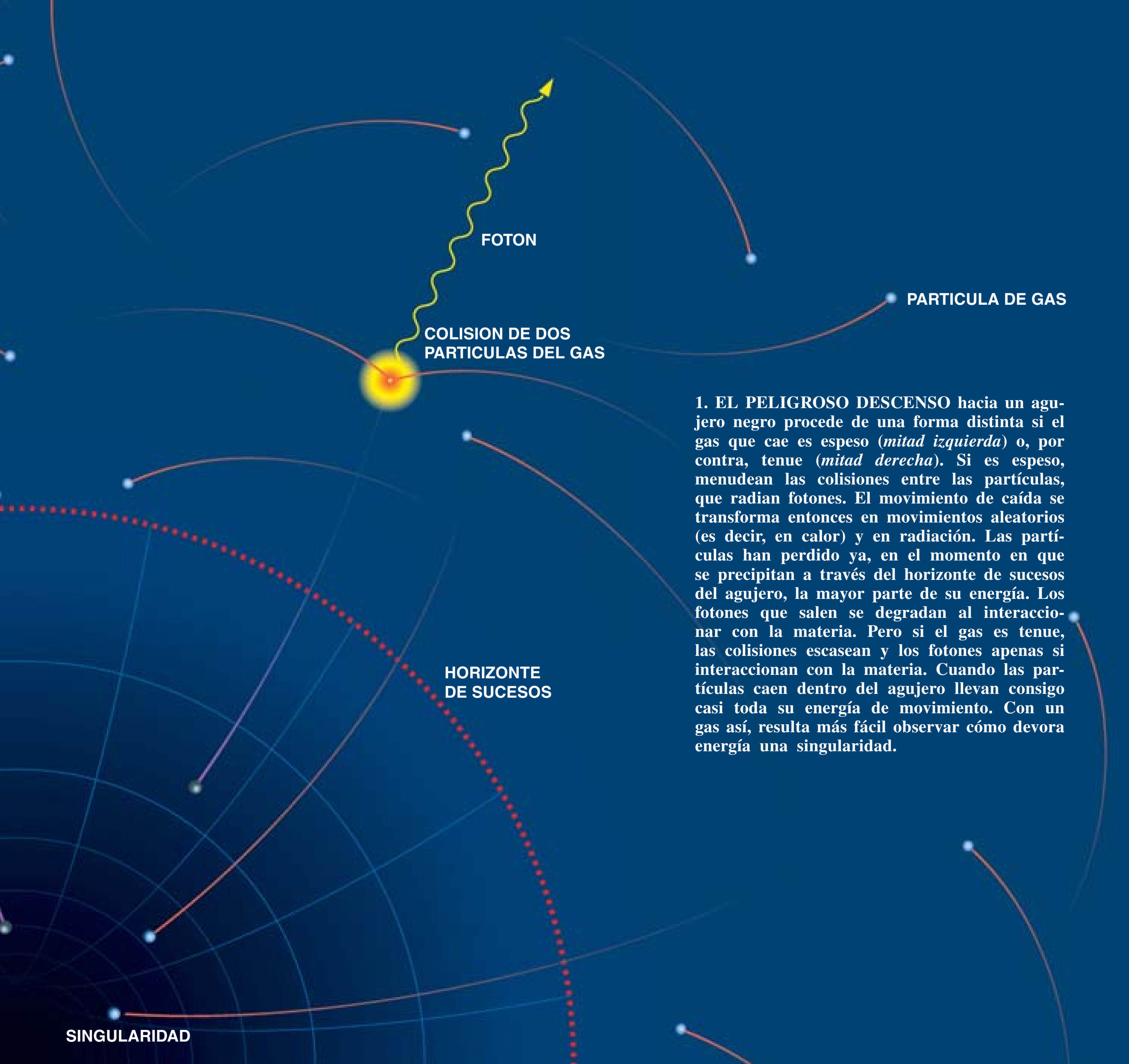
Jean-Pierre Lasota



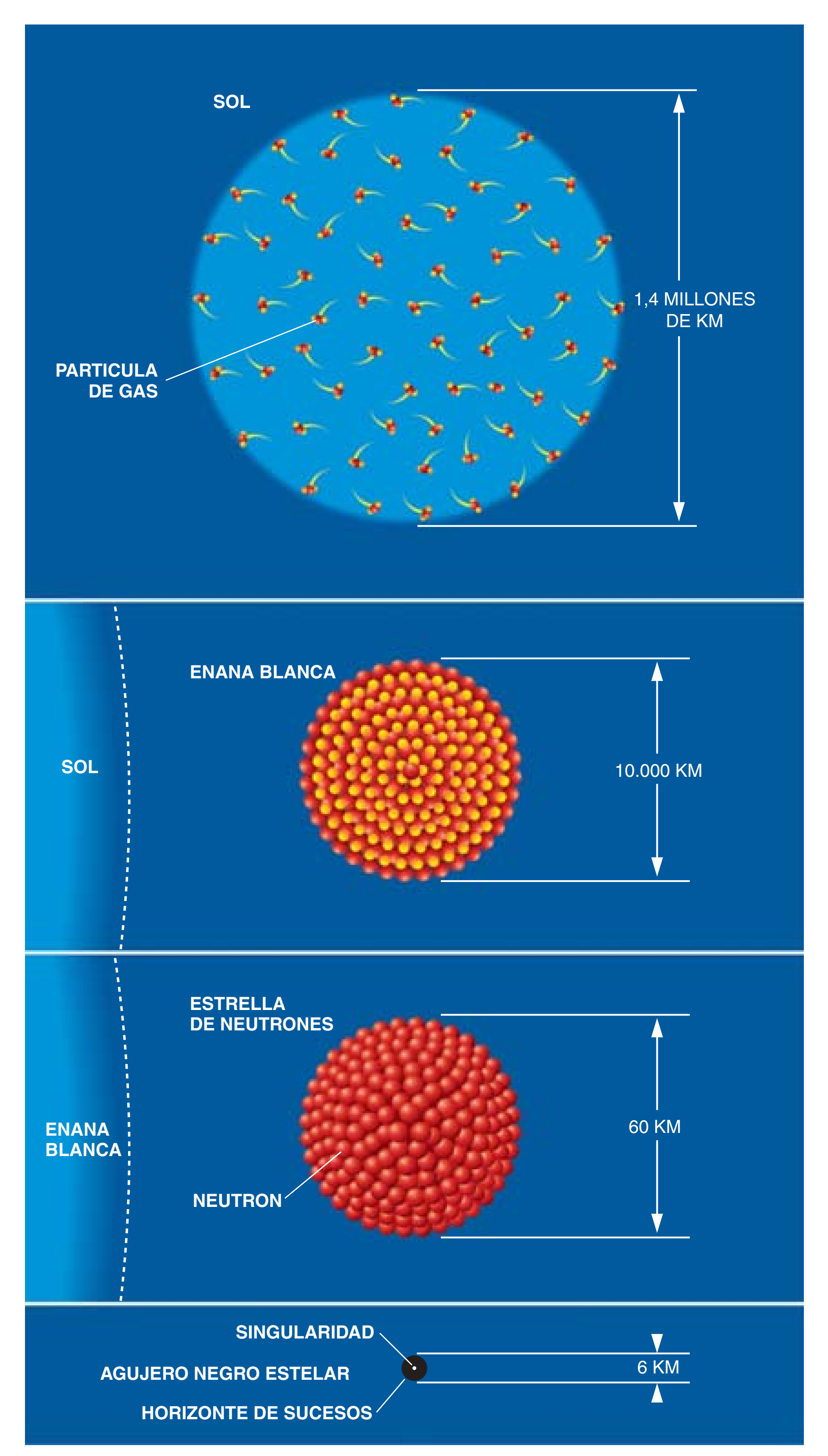
Los astrónomos notan la presencia de los agujeros negros en el universo. Estos cuerpos apasionantes se encuentran en el centro de muchas galaxias (nuestra Vía Láctea entre ellas), forman sistemas binarios con estrellas normales y hasta puede que vaguen solos por el medio interestelar. Se trata de los objetos más compactos del universo y contienen la forma más extrema de materia que conoce la ciencia: la concentración de masas arbitrariamente grandes en un punto matemático casi. Plantean, en consecuencia, grandes dificultades para la observación. A la postre, son negros. No emiten radiación electromagnética, al menos no con una intensidad que podamos esperar detectar alguna vez.

Para inferir su existencia hay que basarse en dos líneas de argumentación indirectas. Cerca del centro de una galaxia las estrellas se mueven a tal celeridad, que escaparían de la galaxia si no las sujetase la gravedad de una masa inmensa, de hasta un millón de veces la solar. Cualquiera que sea objeto de tal masa, presentará una densidad extrema; para los teóricos se trata de un agujero negro, sin alternativa posible. En segundo lugar, muchos centros galácticos y sistemas estelares binarios emiten radiación y materia a un ritmo descomunal. Para ello requieren un proceso extraordinariamente eficaz de generación de energía. En teoría, no hay máquina más eficaz que un agujero.

Con todo, esas pruebas reunidas sólo demuestran la existencia de algún tipo de cuerpo compacto. No permiten declarar que nos hallamos ante agujeros negros en razón de alguna de sus notas distintivas. Se infiere por defecto la presencia de un agujero negro. La identificación resulta harto espinosa en los sistemas binarios, al existir otro cuerpo compacto que comparte con los agujeros algunas propiedades, la estrella de neutrones. Esta forma extrema de la materia —comprimida por la gravedad hasta adquirir una densidad colosal— es, en esencia, un núcleo atómico del tamaño de una ciudad, donde acaban su vida muchas estrellas de masa grande. Una estrella de neutrones de la misma masa que el Sol tendrá el mismo radio (unos 30 kilómetros) que el “horizonte de sucesos” que delimita a un agujero negro de 10



1. EL PELIGROSO DESCENSO hacia un agujero negro procede de una forma distinta si el gas que cae es espeso (*mitad izquierda*) o, por contra, tenue (*mitad derecha*). Si es espeso, menudean las colisiones entre las partículas, que radian fotones. El movimiento de caída se transforma entonces en movimientos aleatorios (es decir, en calor) y en radiación. Las partículas han perdido ya, en el momento en que se precipitan a través del horizonte de sucesos del agujero, la mayor parte de su energía. Los fotones que salen se degradan al interaccionar con la materia. Pero si el gas es tenue, las colisiones escasean y los fotones apenas si interaccionan con la materia. Cuando las partículas caen dentro del agujero llevan consigo casi toda su energía de movimiento. Con un gas así, resulta más fácil observar cómo devora energía una singularidad.



2. LAS ESTRELLAS, VIVAS O MUERTAS, son campos de batalla donde se enfrentan la gravedad y una u otra forma de presión hacia fuera. El equilibrio de fuerzas determina el tamaño de la estrella. (Los tres objetos representados debajo del Sol tienen la misma masa que él.) En una estrella viva ordinaria, el Sol por ejemplo, la presión es gaseosa y se alimenta en última instancia de las reacciones nucleares del núcleo. En una enana blanca —el cadáver denso y encendido de una estrella similar al Sol— la presión se debe a la "degeneración" cuántica, creada al estar los electrones apretadamente empaquetados. En una estrella de neutrones, residuo de la cremación explosiva de una estrella de gran masa, los átomos están machacados y sus núcleos se apiñan. En un agujero negro no hay presión hacia fuera; nada contrarresta la gravedad y la estrella se derrumba hasta convertirse en un punto matemático casi, dentro de una superficie de no retorno, el horizonte de sucesos.

masas solares. Las propiedades observables, la temperatura de la materia que cae es una, no permiten distinguir entre ambos objetos. En la investigación sobre agujeros negros ocupa un lugar central la cuestión de cómo distinguirlos de las estrellas de neutrones.

En los últimos años se ha encontrado una manera de hacerlo. Se basa en una diferencia notable que separa de las estrellas de neutrones a los agujeros negros: aquéllas tienen superficies duras donde puede acumularse la materia; los segundos, en cambio, se tragan la materia que cae en ellos y hacen que desaparezca para siempre. Esa disparidad comporta una distinción sutil en la radiación emitida en la vecindad de cada tipo de cuerpo. Apoyados en ello, se muestra que los objetos más extraños del cosmos no son pura entelequia.

Los agujeros negros deben la eficacia de su mecanismo a una intensísima gravedad. Del horizonte de sucesos no puede escapar nada, ni aunque se mueva a la velocidad de la luz. Esa superficie atrae a los objetos a una velocidad también muy alta; de camino puede que choquen con otros y se destruyan. En consecuencia, en la vecindad del agujero la materia se calienta. Puesto que los objetos se mueven casi a la velocidad de la luz, la energía cinética disponible para su transformación en calor es comparable a la encerrada en su masa en reposo ($E = mc^2$). Para que un objeto regresase a su punto de partida, lejos del agujero, habría de prescindir de una parte considerable de su masa, convertida en energía pura. En este sentido, los agujeros negros transforman masa en reposo en energía térmica.

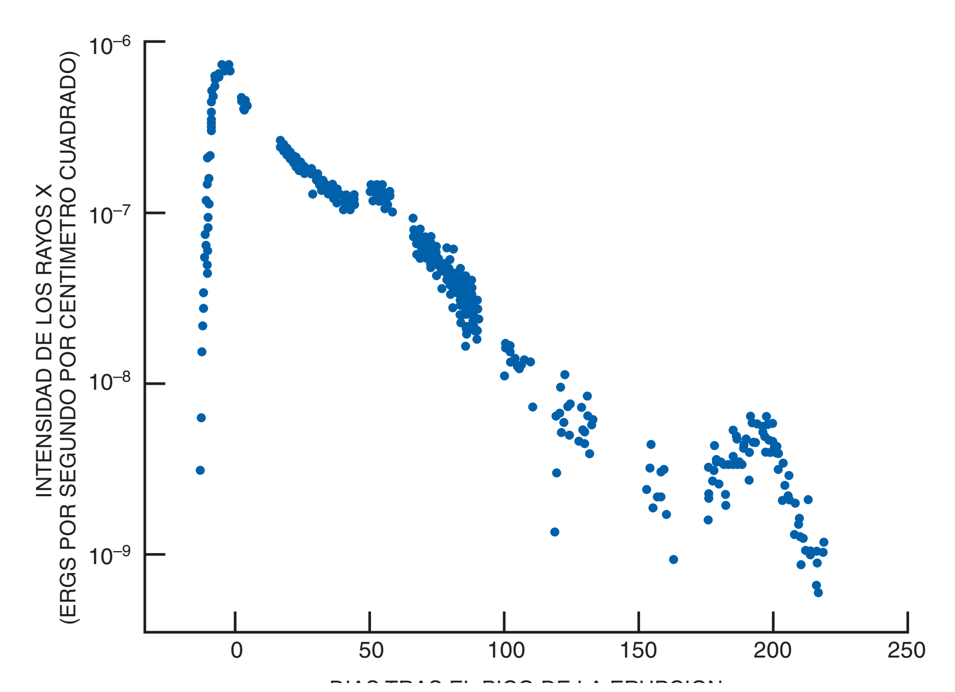
La eficacia de esta conversión depende de la velocidad a la que rote el agujero negro. El momento angular es una de las contadas propiedades de la materia que no se pierde cuando se incorpora a un agujero negro. Aunque no se puede ver directamente la rotación del agujero, provoca que, en la vecindad del horizonte, se deforme el espacio-tiempo. Pero un agujero negro no puede girar alrededor de sí mismo a una velocidad arbitrariamente grande. Por encima de determinado valor, su superficie dejaría de existir. Un agujero que girase casi a su velocidad máxima convertiría el 42 por ciento de la masa que le cayese en energía; uno estático, sólo el 6 por ciento. Por mor de comparación, la eficacia de la fusión termonuclear

de las estrellas es de un 0,7 por ciento; la de la fisión del uranio, el 0,1 por ciento.

Si las partículas que rodean el agujero comparten entre sí su energía —mediante colisiones, por ejemplo—, la temperatura que alcanza la materia en su caída hacia el agujero resulta difícilmente imaginable. La temperatura típica de un protón que esté justo más acá del horizonte corresponde a la conversión de buena parte de su masa en energía pura, unos 10^{13} grados. A una temperatura así, la materia debería ser un ascua de rayos gamma. Pero aunque es fácil calentar los protones (y los iones en general), no son buenos radiadores de energía; en las colisiones transferirán su energía a mejores emisores, en particular a los electrones, que expiden fotones de menores energías, de rayos X por ejemplo. Debería verse, pues, procedente de una espesura de electrones, una intensa emanación de rayos X.

Y eso es, en efecto, lo que se observa en ciertos sistemas de rayos X binarios. El primero se descubrió en 1962. Desde entonces se han identificado cientos. Se trata de las fuentes de rayos X más brillantes del cielo, formadas, según se cree, por un objeto que no se ve y una estrella ordinaria que gira a su alrededor. Algunos emiten radiación sin cesar, otros, llamados sistemas transitorios de rayos X, lo hacen sólo de vez en cuando y durante unos meses cada vez; la mayor parte de su vida la pasan silentes, emitiendo muy pocos rayos X o ninguno. En su mayoría sólo se han avistado en una ocasión. Emiten de 10^{30} a 10^{31} watts en forma de rayos X, es decir, hasta 100.000 veces la producción total del Sol.

La distribución de energía de esta radiación se acerca a la dibujada por la radiación del cuerpo negro. Es similar a los espectros que emiten objetos tan dispares como el Sol, un carbón encendido y el cuerpo humano, sólo que mucho más intensa. El espectro de cuerpo negro lo producirá un medio "ópticamente espeso", lo bastante denso como para que los fotones no puedan abandonarlo sin sufrir muchas colisiones con los electrones. Las colisiones dispersan, destruyen y crean electrones, oscurecen la fuente original de la radiación y promedian los detalles de cada interacción. El espectro resultante depende sólo de la temperatura y tamaño de la superficie emisora. En un gas "ópticamente tenue" los fotones apenas si experimentan interacciones antes de escapar de él; el espectro dependerá de las propiedades concretas de esa materia.



3. LAS ERUPCIONES DE RAYOS X de esta fuente transitoria llegaron al máximo el 13 de agosto de 1975. En unas semanas la intensidad (*eje vertical*) se multiplicó al menos por 10.000. Esta fuente de rayos X, la A0620-00, de la constelación del Unicornio era la más brillante que se hubiese visto. Se había observado una erupción de luz visible en la misma región 58 años antes; mas por entonces no había detectores de rayos X.

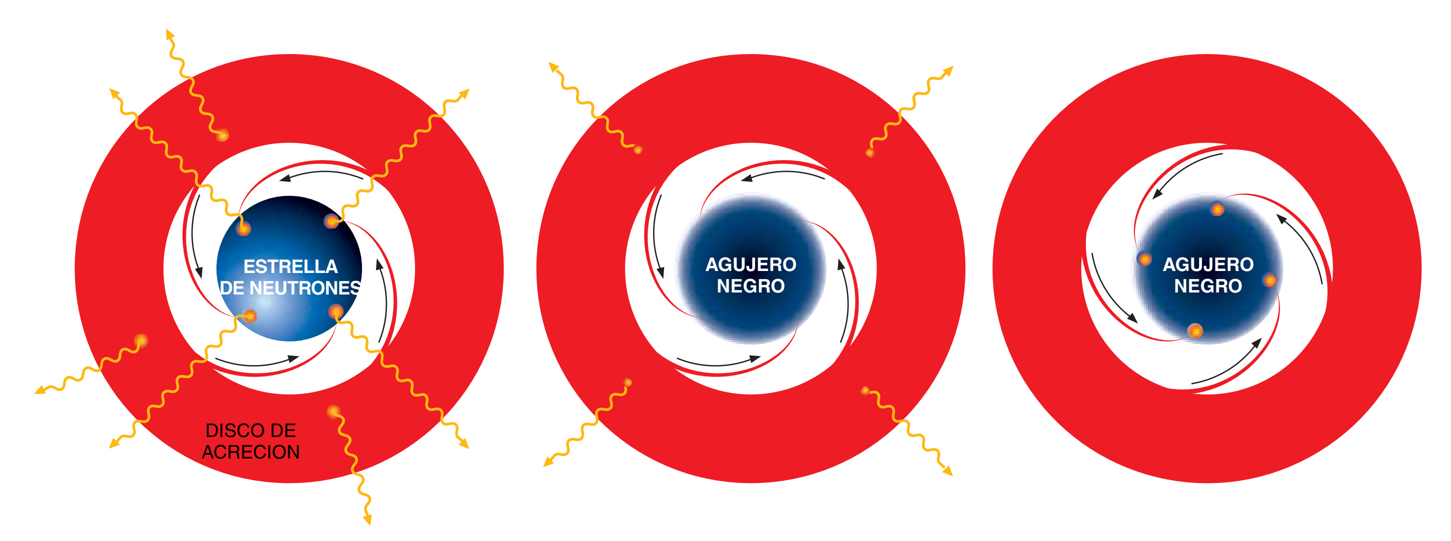
JEAN-PIERRE LASOTA quería de joven estudiar filología e historia. Pero bajo el dominio comunista en su Polonia natal, la docencia de las humanidades estaba impregnada de ideología marxista. Su padre le convenció de que optara por la física. Se ha dedicado a la teoría de los agujeros negros.

Se ha inferido que la temperatura de los rayos X de las binarias es de 10^7 grados, compatible con la esperada para un agujero negro. Para generar la emisión que se observa el agujero tendría que absorber de 10^{-9} a 10^{-8} masas solares al año, lo que concuerda con los cálculos de la velocidad a la que pierden masa las estrellas ordinarias que los acompañan. Por tanto, las binarias de rayos X podrían ser la mejor prueba de que existen agujeros negros con una masa del orden de la de una estrella.

Pero esos mismos argumentos se esgrimen también a propósito de las estrellas de neutrones. Aunque menos poderosas que un agujero negro no dejan de ser unas máquinas formidables. La materia se estrella contra su superficie a la mitad de la velocidad de la luz y se convierte en energía con una eficacia del diez por ciento, no muy lejos de la de un agujero típico.

Se sabe que en muchos sistemas binarios el objeto compacto no es un agujero negro. Se cree que los radiopúlsares encontrados en las binarias son, como los púlsares individuales, estrellas de neutrones magnetizadas que rotan velozmente. Los agujeros negros astronómicos no pueden tener campos magnéticos. Apenas si evidencian rasgos distintivos y no pueden generar las pulsaciones regulares observadas en los púlsares. Ni los púlsares de rayos X pueden ser agujeros negros. Una pulsación estable y regular excluye la presencia de un agujero negro. Hasta las explosiones irregulares de rayos X requieren que haya una estrella de neutrones que proporcione una superficie donde se acumule la materia y estalle de vez en cuando.

Pero la recíproca no es cierta. De la ausencia de pulsaciones o explosiones no se sigue que haya un agujero negro. No se espera, por ejemplo, que se produzcan explosiones de rayos X en una estrella de neutrones a la que se agregue materia a un ritmo muy rápido. Como la tasa de acreción varía con el tiempo, caben las sorpresas.



4. TRES FORMAS DE ACRECION dan tres maneras de desprender radiación. Cuando un gas cae en espiral sobre una estrella de neutrones libera gran parte de su energía al chocar con ella (*izquierda*). Pero el gas que cae dentro de un agujero negro no sufre un impacto; desaparece tras el horizonte, sencillamente. O el gas se va desprendiendo de su energía antes de alcanzar el horizonte (*centro*) —como ocurrirá si su densidad es grande, porque entonces sus átomos chocarán unos con otros— o se la llevará consigo a la tumba (*derecha*). Siguiendo el hilo de la acreción los astrónomos descubren el tipo de objeto involucrado.

Recuérdese que se sospechaba que el sistema Circinus X-1 albergaba un agujero negro hasta que empezó a mostrar explosiones de rayos X.

Los agujeros negros tienen dos propiedades que pueden valer para discernir si cierto sistema binario incluye uno: carecen de superficie dura y no hay límites para su masa. La masa de un agujero está determinada por cómo se formó —en particular, por la masa de la estrella a partir de la cual se desarrolló— y por la cantidad de materia absorbida. Ningún principio de la física señala qué masa llegará a tener un agujero negro. Por otro lado, las estrellas de neutrones no pueden tener una masa arbitrariamente grande.

La masa de cualquier objeto, agujeros negros excluidos, está limitada por la capacidad que manifieste de soportar su propio peso. En las estrellas ordinarias los movimientos térmicos de las partículas —impulsados por la fusión nuclear— producen la presión que impide el derrumbe. Pero las estrellas muertas, como las de neutrones y las enanas blancas, no generan energía. En ellas la presión que se opone a la atracción gravitatoria es el resultado de la degeneración, fuerza pasiva originada por las interacciones mecanocuánticas cuando la densidad es extrema.

Según el principio de exclusión de Pauli, el número de fermiones (clase de partículas elementales que incluye a electrones, protones y neutrones) que pueden embutirse en un espacio dado tiene un límite. En una enana blanca los electrones tienden a ocupar los niveles de menor energía posible. Ahora bien, en razón del principio de Pauli no todos pueden estar en el nivel más bajo. Sólo puede haber dos electrones en cada estado de energía. Los electrones, pues, se van apilando hasta llegar a un determinado nivel de energía, que depende de la densidad. Este apilamiento crea la presión que contrarresta a la gravedad. (El mismo efecto impide que los niveles electrónicos de los átomos se confundan unos con otros.) Como demostró Subrahmanyan Chandrasekhar en 1930, la masa de una estrella enana blanca ha de ser menor de 1,4 masas solares.

En las estrellas de neutrones se adquiere tal densidad, que ni siquiera la degeneración electrónica puede resistir la gravedad. Los átomos se vienen abajo, los protones y los electrones se mezclan y crean neutrones, los núcleos atómicos se unen. El resultado es una bola de neutrones. Las partículas, al no poder ocupar todas el mismo nivel de energía, se apilan y generan una presión hacia fuera.

Las propiedades de la materia nuclear degenerada se conocen mal porque hay que tomar en cuenta las interacciones fuertes entre los neutrones (y los quarks que los constituyen). Por esta razón no se sabe con seguridad cuál es la masa máxima de una estrella de neutrones, si bien un argumento sencillo impone un máximo absoluto. En una estrella degenerada, la atracción gravitatoria crece con la masa. Para resistir esa atracción aumentada, la materia se vuelve más rígida. Por encima de cierta masa crítica llegaría a serlo tanto, que el sonido se propagaría a mayor velocidad que la luz, contraviniendo los principios básicos de la relatividad. Esa masa crítica sextuplica la solar. Según un cálculo más detallado efectuado por grupos estadounidenses, franceses y japoneses la masa máxima no llega a las tres masas solares. Ninguna estrella de neutrones que se conozca supera las dos masas solares.

Por eliminación, se llama agujero negro a un objeto compacto cuya masa supere las tres masas solares. La medición de las velocidades de las estrellas, combinada con las leyes de Kepler del movimiento orbital, establece un límite inferior a las masas estelares en un sistema binario. Se conocen hasta siete binarias transitorias de rayos X en las que el objeto compacto satisface este criterio de existencia de un agujero negro. Con algunos supuestos adicionales, se ha calculado que la verdadera masa de estos agujeros varía entre las 4 y las 12 masas solares.

La identificación de esos objetos con los agujeros negros sería más fiable si mostrasen la otra característica que una estrella de neutrones no puede tener: un agujero negro carece de superficie dura. El horizonte de sucesos es una superficie de la que no se vuelve. Todo lo que la atraviesa desaparecerá para siempre de nuestro universo.

Una porción de plasma caliente que caiga en un agujero negro no tendrá tiempo suficiente para radiar toda su energía térmica; su calor

Un agujero negro en acción

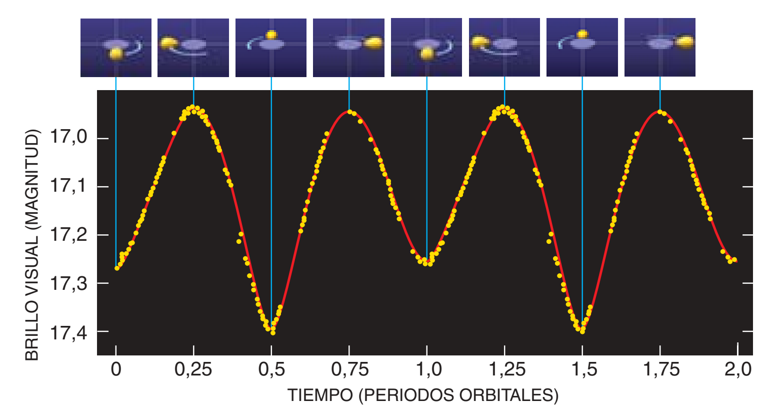
Jeffrey E. McClintock

No hay mejor sitio donde mirar, para una astrónomo que quiera observar la absorción de energía por un agujero negro, que una fuente transitoria de rayos X. Las típicas son objetos celestes cuyo brillo, en una semana, se centuplica en la gama de la luz visible y aumenta un millón de veces en el dominio de los rayos X. Persisten resplandeciendo durante un año más o menos, hasta que vuelven a apagarse y caer en el olvido. Otras fuentes variables de rayos X, las erupciones de rayos X y las estrellas pulsantes de rayos X, no producen esos aumentos intensos, largos y raros del brillo.

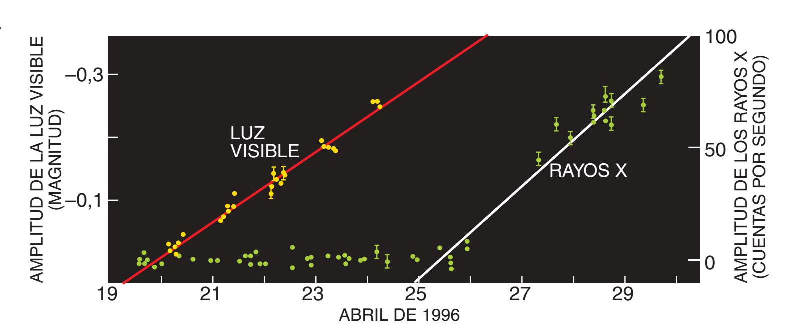
Los astrónomos calculan que en nuestra galaxia hay sin descubrir varios miles de fuentes transitorias de rayos X dormidas. Se ha detectado alrededor de una docena en el momento de su erupción. Son objetos compactos —un agujero negro o una estrella de neutrones— que están atrayendo y agregándose el gas de una infortunada estrella compañera.

De estos sistemas, ninguno ha ofrecido mayores tesoros que la fuente transitoria GRO J1655-40, un agujero negro. Shuan Nan Zhang y su grupo lo descubrieron en 1994 gracias al satélite *Observatorio de Rayos Gamma*. Desde entonces se han ido viendo las variaciones de la velocidad orbital de la estrella compañera (lo que permite medir con precisión la masa del objeto compacto), las señales que desvelaron que se trataba de un agujero negro, una sugerente oscilación en las proximidades de éste y unos chorros de materia proyectados casi a la velocidad de la luz.

A partir de la velocidad de la compañera se calcula la cota inferior de la masa del objeto compacto: 3,2 veces la masa solar. Costaba obtener un mejor cálculo de la masa porque había que conocer los valores de otras dos magnitudes: la masa de la estrella y la inclinación de la órbita con respecto a nuestra línea de visión. Se determinaron a partir de los cambios de la intensidad de la luz de la estrella, conforme giraba alrededor del agujero negro (*centro, a la derecha*). La intensidad máxima se produce cuando se ve la estrella, alongada por la gravedad del agujero, por su parte más ancha. El mínimo ocurría un cuarto de órbita más tarde, cuando se veía una de sus puntas. Por un golpe de suerte, resultó que el plano orbital y el disco de acreción eran casi perpendiculares con respecto a nuestra línea de visión. Además, la superficie de la compañera estaba libre de máculas, de manchas solares. El resultado fue la medición de la masa de un posible agujero negro más precisa jamás efectuada: 7,0 masas solares.



GRACIAS AL BRILLO OSCILANTE de la estrella compañera se ha podido pesar el agujero negro del sistema binario GRO J1655-40. No es normal que una estrella se encienda y apague así. Pero a ésta la ha deformado la gravedad del agujero. Como una pera, es mayor vista de costado y parece que entonces genera más luz (*recuadros insertados*). El período orbital manifiesta la masa del agujero.



SEIS DIAS después de que el sistema binario GRO J1655-40 empezara a brillar más en la luz visible (*izquierda*) comenzó también a emitir rayos X (*derecha*).

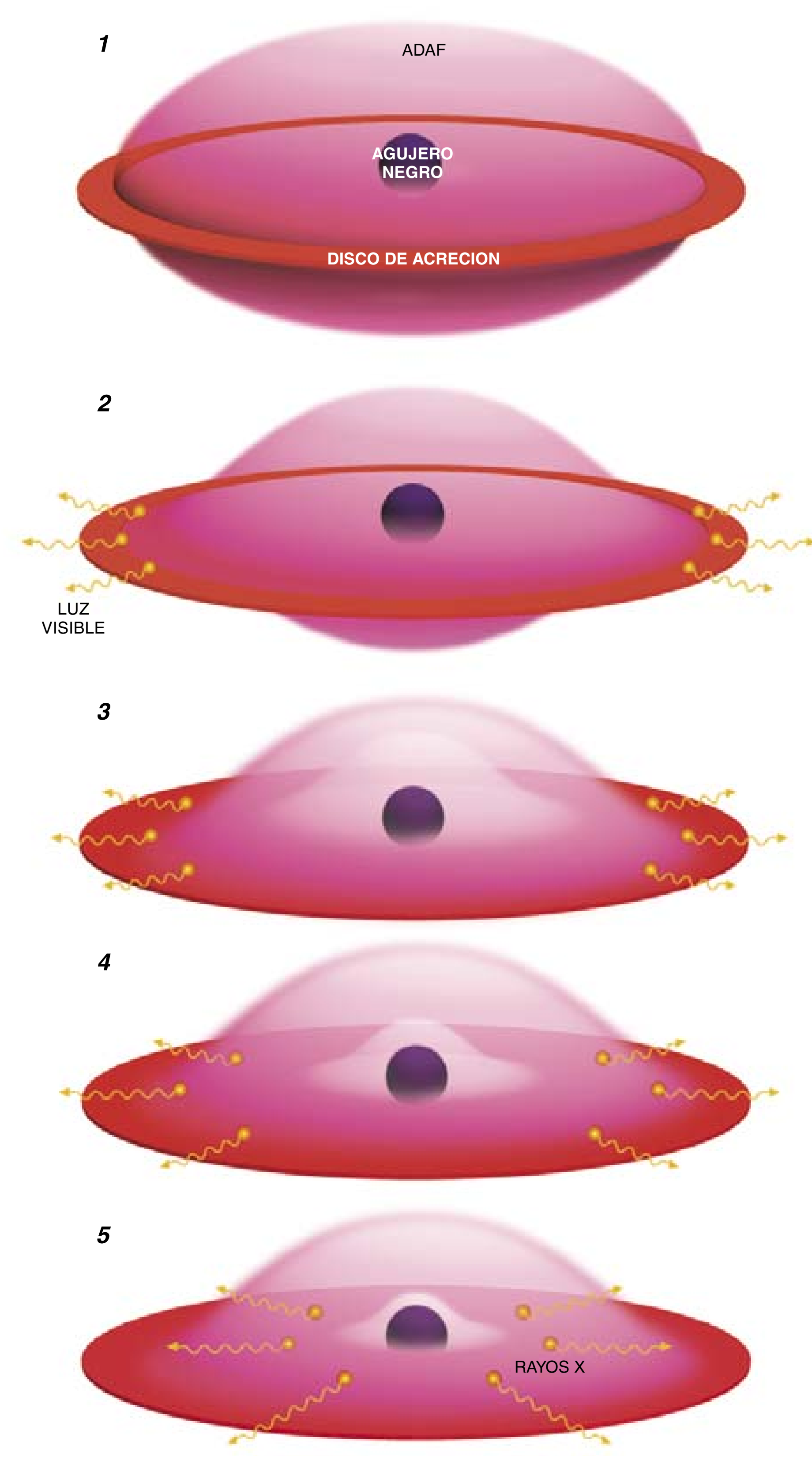
Con un comportamiento sin precedentes para una fuente transitoria de rayos X, GRO J1655-40 tuvo un par de erupciones muy seguidas, en 1994 y 1996. El constante aumento de brillo de la luz visible empezó unos seis días antes de que comenzase la erupción de rayos X el 25 de abril de 1996 (*abajo, a la derecha*). Los teóricos creen que el retraso se debió a que a la materia le lleva tiempo difundirse hacia el interior y apelmazar el gas cercano al agujero. De la forma del espectro de rayos X se seguía que el agujero giraba casi al 90 por ciento de la velocidad máxima que le sería posible.

Cuatro meses después, el grupo de Ronald A. Remillard detectó con el satélite *Explorador Rossi de la Variación Temporal de los Rayos X* unas oscilaciones ocasionales de la radiación X. Esas vibraciones se producían 300 veces por segundo; eran las más veloces jamás vistas en un sistema de agujero negro. Según la teoría, la frecuencia de la vibración depende del radio del horizonte de sucesos del agujero negro, que a su vez depende de la masa y de la velocidad de rotación de dicho objeto. Teniendo en cuenta la masa que se le ha medido al sistema, se busca ahora la primera determinación firme de la velocidad de rotación de un agujero negro.

Pasada la erupción, el sistema lanzó durante varios meses dos chorros de materia, uno a cada lado de la fuente, a un 92 por ciento de la velocidad de la luz. Esa materia se aceleró seguramente en el borde interior del disco de acreción, donde el gas está forzado a girar alrededor del agujero a casi la velocidad de la luz.

En estos momentos el sistema ha vuelto ya a su estado silente. El gas, ahora, en vez de caer en espiral mientras despide rayos X se precipita directamente y no le da tiempo a radiar antes de ser atrapado. El resultado es que los átomos del gas y alrededor del 99,9 por ciento de su energía térmica escapan de nuestro universo, donde nunca más se los verá.

JEFFREY E. McCLINTOCK es investigador del Centro Smithsoniano de Harvard para Astrofísica. Descubrió en 1986 el primer agujero negro que formaba parte de un sistema de rayos X transitorio.



5. FLUJO DE ACRECION de un sistema transitorio de rayos X. Consta de un gas caliente, tenue, esférico (*rosa*) abrazado por un disco de acreción frío, denso, plano (*rojo*). En su estado usual, silente (*1*), el gas caliente cae en el agujero negro y emite sólo una pequeña cantidad de radiación, orden de cosas que los astrónomos llaman flujo de acreción dominado por la advección (ADAF). Pero en una erupción el inestable disco se calienta y las estrellas resplandecen en la luz visible (*2*). El borde interior del disco empieza a avanzar hacia el agujero (*3, 4, 5*) y reemplaza el ADAF hasta que empieza la emisión de rayos X. Este modelo explica el retraso de seis días entre la erupción visible y la de rayos X en GRO J1655-40.

será arrastrado con ella hasta el interior del agujero. Los observadores no verían nunca su energía, "engullida" a través del horizonte hasta desaparecer. Semejante fuga no viola la ley de conservación de la masa-energía, porque la energía térmica se incorpora a la masa del agujero. Pero reduce grandemente la eficacia aparente de éste como máquina. Mas si un plasma caliente cae sobre una estrella de neutrones, toda su energía acaba radiándose, bien porque lo haga el propio plasma, bien porque lo haga la superficie de la estrella de neutrones.

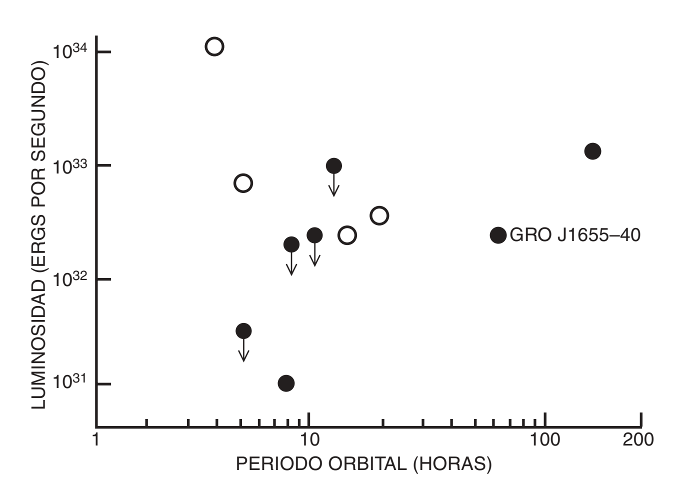
La circunstancia, pues, en que mejor se distinguiría un agujero negro de una estrella de neutrones sería cuando la materia que se agregase no pudiera expedir su calor antes de encontrarse con el horizonte o con la superficie. En un seminario celebrado en Kyoto en 1995 llamé a esos flujos ADAF (flujos de acreción dominados por la advección), denominación que hoy es de uso común. Los plasmas muy calientes y tenues son pésimos radiadores. Por eso se han buscado fuentes de rayos X y gamma que aparezcan más oscuras de lo que serían si su rendimiento radiativo rondara el diez por ciento.

La materia que se precipita hacia un objeto compacto no avanza en corto y por derecho. En virtud de la conservación del momento angular, se instala en órbitas más o menos circulares. Desde allí caerá sólo si hay rozamiento, que va quitando momento angular. La fricción calienta, además, el gas que se va agregando; si el gas puede enfriarse eficazmente perderá energía orbital y formará una estructura plana y delgada: un disco de acreción. Se han observado estos discos en muchos sistemas binarios. Pero si el enfriamiento es ineficaz, como ocurre en el caso de los ADAF, la materia adoptará una configuración casi esférica.

En 1977 Setsuo Ichimaru se valió ya de esta idea para explicar algunas propiedades de la binaria de gran masa Cygnus X-1, que incluye el primer posible agujero negro reconocido. Su trabajo pasó inadvertido. El reciente interés por los ADAF parte de 1994, con los modelos teóricos simples de ADAF ópticamente tenues de Ramesh Narayan e Insu Yi, de la Universidad de Harvard, y de Marek Abramowicz y Ximing Chen, de la de Gothenburg, Shoji Kato, de la de Kyoto, Oded Regev, de la Tecnion de Haifa, y el autor. En manos de es-

tos investigadores, a los que debemos sumar Ann Esin, Rohan Mahadevan y Jeffrey E. McClintock, del Centro Smithsoniano de Harvard para la Astrofísica, y Fumio Honma, de Kyoto, los modelos de los ADAF han ido de éxito en éxito. Un ADAF explica ahora el espectro del centro de nuestra galaxia, reivindicando una idea adelantada por Martin J. Rees, en 1982.

Parece que hay un tipo de sistema binario, las fuentes transitorias silentes de rayos X, que posee un flujo de acreción con dos componentes. La parte interior es un ADAF; la exterior forma un disco de acreción plano. Estos sistemas pasan la mayor parte del tiempo silentes, en cuyo estado la débil radiación que se observa es emitida, en buena medida, por el ADAF. De vez en cuando emiten un pulso intenso de radiación. Por ser los ADAF de suyo estables, las erupciones deben desencadenarse en el disco exterior.



6. PRUEBA DE LA PRESENCIA de agujeros negros, obtenida comparando objetos de más de tres masas solares (*círculos negros*) y de menos (*círculos blancos*). Los pesados no brillan tanto como los ligeros aunque tengan el mismo período orbital (*eje horizontal*). Sin embargo, dos objetos con el mismo período orbital agregan materia al mismo ritmo, así que deberían emitir más o menos la misma cantidad de radiación. Entenderemos la discrepancia si desaparecen materia y energía de nuestro universo, operación que sólo un agujero puede realizar. (Las flechas indican las cotas superiores de una medición.)

El 20 de abril de 1996 un equipo de astrónomos —McClintock, Ronald Remillard, Jerome Orosz y Charles Bailyn — observaban el sistema de rayos X transitorio GRO J1655-40. Daba la impresión de que algo no funcionaba en el proceso observador. Cayeron pronto en la cuenta de su suerte: estaban captando un suceso muy raro, un pulso de radiación. A lo largo de los cinco días siguientes el brillo del sistema se intensificó en la luz visible, aunque persistió sin detectarse en rayos X.

Al sexto día empezó a resplandecer en rayos X. Como explicamos Jean-Marie Hameury, McClintock, Narayan y yo, el retraso fue justo el que cabía esperar con un flujo de acreción de dos componentes. El disco exterior, lejos del agujero negro, emite luz pero no rayos X. Por eso se produce al principio una erupción sólo en las longitudes de onda de la luz visible. Luego, la materia corre hacia el agujero negro más deprisa; la tenue región del ADAF se va llenado hasta que empieza a emitir rayos X. Las observaciones fueron una hermosa e inesperada confirmación de esta teoría.

Narayan, McClintock y Michael García fueron los primeros, valiéndose de los sistemas transitorios de rayos X, en avanzar un criterio cuantitativo para distinguir entre objetos con superficies duras (estrellas de neutrones) y objetos carentes de ellas (agujeros negros). Propuse yo otro criterio, basado en que las fuentes transitorias silentes con estrella de neutrones han de ser más brillantes que los agujeros negros que agreguen materia al mismo ritmo. No puede medirse directamente la tasa de acreción; en su lugar podemos valernos del período orbital, pues dos objetos con el mismo período han de absorber materia a pareja velocidad. Juntando todas las piezas, se llega a la conclusión de que un sistema con agujero negro será más oscuro que otro con estrella de neutrones y el mismo período orbital. Puesto que sólo se conocen los períodos orbitales de un puñado de sistemas de esta naturaleza, no se ha determinado todavía bien la diferencia que se espera. Aun así, para un período orbital dado los agujeros negros confirmados son, en efecto, más oscuros que las estrellas de neutrones.

Aunque trabajos recientes han sembrado dudas sobre el modelo simple de los ADAF porque no tiene en cuenta los flujos hacia fuera, los modelos generales siguen necesitando de la presencia de un agujero negro para reproducir las observaciones. La creación de modelos de los flujos que caen hacia los agujeros negros es un campo de investigación muy activo. En cualquier caso, los cuerpos con una masa demasiado grande para ser estrellas de neutrones pueden ahora pasar de la categoría de posible agujero negro a la de agujero negro confirmado. Sólo un objeto con un horizonte de sucesos hace que la energía desaparezca tal y como los astrónomos infieren que acontece en esos sistemas. Las observaciones que pronto efectuarán algunos observatorios de rayos X, el Chandra, el XMM, alargarán seguramente la lista. Los agujeros negros continuarán siendo negros, pero ya no podrán ocultarse tras un disfraz. Estamos aprendiendo a quitarles la careta.

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

BLACK HOLES, WHITE DWARFS AND NEUTRON STARS: THE PHYSICS OF COMPACT OBJECTS. Stuart L. Shapiro y Saul A. Teukolski. John Wiley & Sons, 1983.

BLACK HOLES AND RELATIVISTIC STARS. Dirigido por Robert M. Wald. University of Chicago Press, 1998.

GRAVITY'S FATAL ATTRACTION: BLACK HOLES IN THE UNIVERSE. Mitchell C. Begelman y Martin J. Rees. W. H. Freeman and Company, 1998.

PROBING STRONG GRAVITATION FIELDS IN X-RAY NOVAE. Jeffrey E. McClintock, en *Accretion Processes in Astrophysical Systems: Some Like It Hot!* Dirigido por Stephen S. Holt y Timothy R. Kallman. American Institute of Physics, 1998. *Preprint* disponible en xxx.lanl.gov/abs/astro-ph/9802080 en la World Wide Web.

ADAFS: MODELS, OBSERVATIONS AND PROBLEMS. Jean-Pierre Lasota en *Physics Reports*, vol. 311, núms. 3-5, págs. 247-258; abril de 1999. *Preprint* disponible en xxx.lanl.gov/abs/astro-ph/9806064 en la World Wide Web.

Regeneración de las células nerviosas en adultos

Según tesis defendida en neurología, el cerebro humano adulto no regenera sus células. Pero semejante declaración debe revisarse. Más aún, la capacidad formadora recién descubierta podría llevarnos al tratamiento eficaz de las enfermedades neurológicas

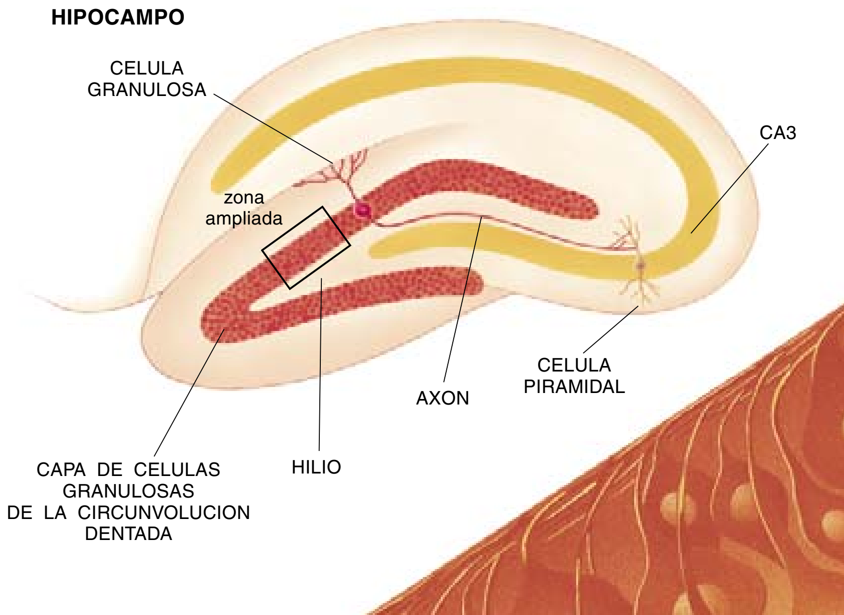
Gerd Kempermann y Fred H. Gage

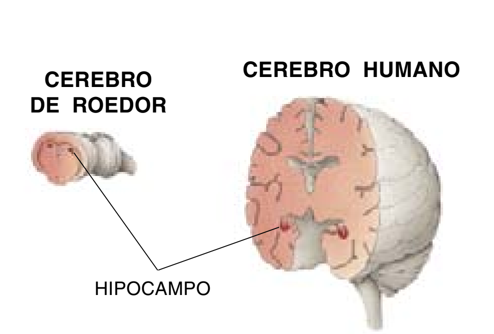
Si nos rasgamos la piel, la herida se cerrará en pocos días. Si nos rompemos la pierna, la fractura se soldará, siempre que el hueso esté en la posición correcta. Casi todos los tejidos se autorreparan en alguna medida a lo largo de la vida. Mucho tienen en ello que ver las células madre, versátiles; se parecen a las del embrión en desarrollo por su capacidad de multiplicarse punto menos que ilimitada y de generar no sólo copias de sí mismas, sino también tipos celulares diversos. La médula ósea proporciona un ejemplo esclarecedor. De las células madre de la médula proceden todas las células de la sangre: eritrocitos, plaquetas y leucocitos. Otras células madre producen los diversos componentes de la piel, el hígado o el epitelio intestinal.

El cerebro de un humano adulto puede, a veces, compensar la lesión sufrida estableciendo nuevas conexiones entre las neuronas supervivientes. Pero no puede repararse a sí mismo, pues carece de células madre que permitan la regeneración neuronal. Al menos eso era lo que la neurobiología aceptaba hasta hace muy poco.

En noviembre del año pasado, Peter S. Eriksson, del Hospital Universitario Sahlgrenska de Goteburg, Gage, del Instituto Salk de Investigaciones Biológicas de La Jolla, y varios participantes hicieron pública una sorprendente noticia: en el cerebro humano se generan neuronas de forma habitual, al menos en el hipocampo, un área importante relacionada con la memoria y el aprendizaje. (Si bien en el hipocampo no se almacena la memoria, colabora en su formación, después de integrar señales procedentes de otras regiones cerebrales. Las personas con lesiones hipocampales tienen problemas para adquirir conocimientos nuevos, pero pueden recordar la información aprendida antes de la lesión.)

Comparada con el número total de células del cerebro, la cifra absoluta de células nuevas es pequeña. Aun así, considerando los recientes hallazgos en animales, el descubrimiento insinúa prometedoras posibilidades en medicina. A tenor de los datos disponibles, las células madre podrían producir neuronas nuevas en otra región del cerebro humano y residen, probablemente, si bien inactivas, en localizaciones adicionales. Pese a su pobre autorreparación, el cerebro adulto podría, en realidad, albergar un gran potencial de regeneración neuronal. Si se descubriera cómo provocar que las células madre existentes generen una cantidad útil de células nerviosas funcionales en partes seleccionadas del cerebro, se





aliviarían los trastornos relacionados con la lesión y la muerte neuronal; estamos pensando en la enfermedad de Alzheimer y en el Parkinson, así como en las discapacidades que acompañan al accidente cerebrovascular y a los traumatismos.

Por sorprendente que haya resultado el hallazgo de producción de neuronas en el cerebro humano maduro, no hemos de olvidar que ciertos estudios con otros mamíferos adultos habían proporcionado pistas desde hacía años. En 1965, Joseph Altman y Gopal D. Das, del Instituto de Tecnología de Massachusetts, describieron el desarrollo de neuronas (neurogénesis) en el hipocampo de ratas adultas, concretamente en la circunvolución dentada (*gyrus dentatus*), la misma área hipocampal donde se ha observado el fenómeno en humanos.

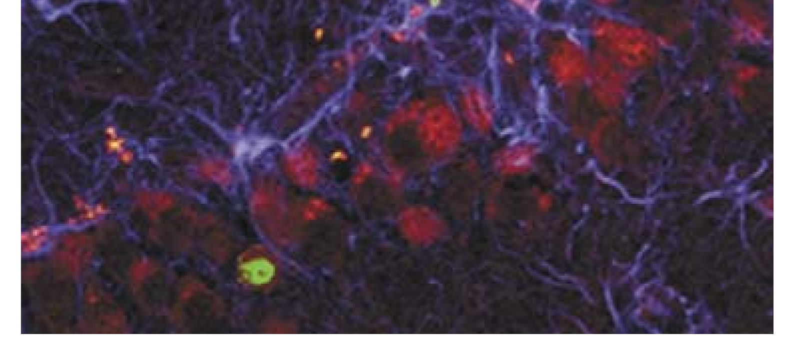
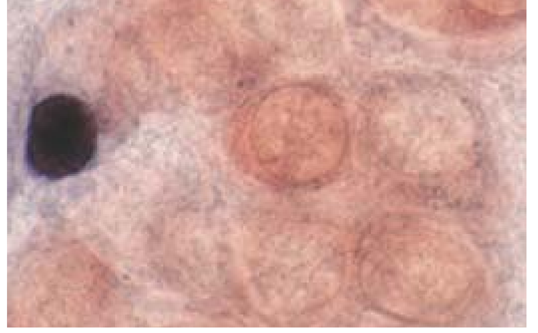
Otros estudios confirmaron el informe de Altman y Das. Pero la mayoría de los investigadores no vieron en esos datos una prueba concluyente de la neurogénesis en mamíferos adultos; ni siquiera los consideraron indicio de que el cerebro humano escondiera la capacidad de regenerarse. Los métodos entonces disponibles no podían estimar el número de neuronas que se formaban, ni demostrar que esas nuevas células fueran neuronas. Por no conocerse, se ignoraba incluso la noción de células madre encefálicas. Para que aparecieran nuevas neuronas, la ciencia dominante exigía la replicación de células maduras, una hazaña increíble. Se subestimó la pertinencia de los hallazgos señalados para el cerebro humano. Lo que tenía su explicación. Nadie había obtenido pruebas definitivas de neurogénesis en chimpancés o monos, que son primates y, por tanto, más próximos genética y fisiológicamente a los seres humanos que otros mamíferos.

Así quedó la cuestión hasta mediados de los años ochenta cuando Fernando Nottebohm, de la Universidad Rockefeller, sacudió el campo con resultados espectaculares en canarios adultos. Descubrió que la neurogénesis ocurría en los centros cerebrales responsables del aprendizaje del canto; más aún, que el proceso se aceleraba durante las estaciones en las que los pájaros adultos aprendían sus canciones. Nottebohm y sus colaboradores también demostraron que la formación de neuronas en el hipocampo de los carboneros aumentaba durante las estaciones que más demandaban de la memoria de los pájaros, en particular cuando los animales tenían que seguir la pista de alimentos guardados y dispersos aquí y allá. Los resultados de Nottebohm volvieron a despertar el interés por el proceso de neurogénesis en mamíferos adultos y, por supuesto, a retomar en consideración la posibilidad de capacidad regenerativa en el cerebro humano adulto.

El optimismo engendrado en torno a la neurogénesis en humanos se esfumó en seguida. Por aquel entonces, el grupo de Pasko Rakic, de la Universidad de Yale, inició sus estudios sobre neurogénesis en primates adultos. En su trabajo de investigación, impecable para la época, no hallaron nuevas neuronas en el cerebro de monos rhesus adultos.

La lógica continuaba oponiéndose a la regeneración neuronal en el cerebro adulto del hombre. La biología mostraba que la neurogénesis había ido restringiendo progre-

1. NEUROGENESIS en el hipocampo del cerebro adulto, una región vinculada con la memoria. Las etapas del proceso se han identificado en la circunvolución dentada del hipocampo de roedores. Las células madre indiferenciadas se dividen (*1*) en la zona que separa la capa de células granulosas (que contienen los cuerpos celulares granulares de las neuronas granulosas) y el hilio (área adyacente formada por los axones de las neuronas granulosas, esto es, las proyecciones que transmiten las señales). Algunas de las células resultantes se adentran en el interior de la capa de células granulosas (*2*). Por último, algunas de estas células se diferencian y transforman en neuronas granulosas completas, con sus proyecciones características (*3*).

2. FORMACION de neuronas cerebrales revelada en estas micrografías de tejido de hipocampo, procedente de adultos que murieron por cáncer. En estas imágenes obtenidas mediante diversos métodos, las neuronas se ven de color rojo. El color verde de una neurona en la imagen izquierda y el sombreado oscuro de una neurona en la imagen de la derecha indican que los cromosomas de estas células contienen bromodesoxiuridina (BrdU). Sustancia que se inyectó en los pacientes para estudiar el crecimiento tumoral. La bromodesoxiuridina se integra en el ADN de las células en división, como es el caso de las células madre, pero no en el de las neuronas ya formadas. Su presencia revela que las células marcadas maduraron en neuronas después de la administración de bromodesoxiuridina, hacia el final de la vida de los pacientes.

sivamente su alcance en el curso evolutivo, conforme el cerebro ganaba en complejidad. Mientras que los lagartos y otros animales inferiores disfrutan de una regeneración neuronal plena ante una lesión cerebral, los mamíferos carecen de respuesta tan eficaz. Parecía razonable suponer que la adición de neuronas en las intrincadas redes del cerebro humano debía amenazar el flujo ordenado de las señales a lo largo de las vías establecidas.

Pero la debilidad de esta argumentación terminó por salir a flote. El equipo dirigido por Elizabeth Gould y Bruce S. McEwen, de Rockefeller, y por Eberhard Fuchs, del Centro Alemán de Primates de Göttingen, dieron cuenta en 1997 de la presencia de cierto grado de neurogénesis en el hipocampo de tupaiidos. En marzo de 1998 observaron el mismo fenómeno en el *Callithrix*. Más alejados de los humanos, desde un punto de vista evolutivo, que los monos rhesus, los calitrícidos también son primates.

Para determinar si los humanos adultos poseen capacidad de neurogénesis, podría estudiarse directamente en personas. Pero esa vía de investigación parecía vedada, por la imposibilidad de transferir a las personas los métodos aplicados a la demostración de la formación de nuevas neuronas en animales.

GERD KEMPERMANN y FRED H. GAGE colaboran desde 1995, cuando el primero llamó a la puerta del laboratorio de Gage en el Instituto Salk de Investigaciones Biológicas en La Jolla. Kempermann trabaja ahora en la Universidad de Regensburg. Gage comparte la investigación en el Salk con la docencia en la Universidad de California en San Diego.

Las técnicas empleadas, aunque varíen, se fundan en la duplicación de los cromosomas previa a la división celular. Cada célula hija recibe así una dotación cromosómica completa. En los experimentos, se inyecta en los animales un material marcado (un marcador) que se integra sólo en el ADN de las células que se preparan para la división. El marcador pasa luego a formar parte del ADN de las células hijas resultantes, que lo transmitirán a su vez a la progenie celular subsiguiente.

Algunas de las células marcadas no tardarán en diferenciarse, en transformarse en neuronas específicas o en glía (el otro tipo básico de células del cerebro). Transcurrido el tiempo necesario para la diferenciación, se extrae el cerebro. Se corta en secciones. Se tiñen los cortes para su observación al microscopio. Aquellas células que presenten el marcador (prueba de su procedencia de la célula en división) y porten, asimismo, las características anatómicas y químicas propias de neuronas se tomarán por células devenidas neuronas después de la administración del marcador. Las neuronas ya diferenciadas ni se dividen, ni pueden incorporar el marcador; difícilmente podrían presentarlo.

Resulta evidente que no podíamos seguir esa pauta para abordar el fenómeno en humanos. Un obstáculo insuperable hasta que Eriksson dio con una solución tras un año sabático en Salk. En el ejercicio de sus tareas clínicas, se encontró cierto día conversando con un oncólogo. Adentrados en la charla, Eriksson se enteró de que la sustancia empleada de marcador de las células animales en división —bromodeoxiuridina (BrdU)— se administraba a pacientes con cáncer de lengua o de laringe terminales. Los enfermos en cuestión se hallaban encuadrados en un ensayo experimental y se les inyectaba el compuesto para controlar el crecimiento del tumor.

Si pudiera obtenerse, pensó Eriksson, el hipocampo de los participantes en el estudio cuando murieran, los análisis realizados en Salk permitirían identificar las neuronas y observar si había alguna que portara el marcador de ADN. La presencia de BrdU significaría que las neuronas interesadas se formaron después de la administración de la sustancia. En otras palabras, el estudio podría demostrar la realidad de un proceso de neurogénesis en pacientes adultos, presumiblemente mediante proliferación y diferenciación de células madre.

Eriksson obtuvo el consentimiento de los pacientes para el estudio post mórtem de su cerebro. Desde principios de 1996 hasta febrero de 1998, acudió al hospital, para extraer muestras de tejido cerebral de cinco individuos, que habían fallecido a edades comprendidas entre cincuenta y siete y setenta y dos años. De acuerdo con lo esperado, todos ellos presentaban neuronas nuevas —específicamente células granulosas— en la circunvolución dentada. Merced a la generosidad de los pacientes, que donaron su órgano para esta causa, contamos con la prueba de la neurogénesis en humanos adultos. (Por la fecha en que se hizo público el estudio, los grupos de Gould y Rakic daban cuenta de la producción de células nerviosas en el hipocampo de monos rhesus adultos.)

Por supuesto, la mera demostración de la existencia de neurogénesis en humanos no basta. Si se busca inducir la regeneración neuronal controlada en el cerebro, habrá que localizar las células madre capaces de devenir neuronas. Deberá también asegurarse de que las neuronas derivadas de

estas células sean funcionales, que envíen y reciban señales de forma apropiada. Para nuestra fortuna, el descubrimiento de la correspondencia entre la neurogénesis en el hipocampo de roedores y la de humanos significa que podemos volver a la investigación con ratones para descubrir claves inéditas.

Los trabajos acometidos con roedores han revelado que se produce en el curso de la vida cierto grado de neurogénesis, no sólo del hipocampo, sino también en el sistema olfatorio del cerebro. Las células madre residen en el septo (relacionado con la emoción y el aprendizaje), el cuerpo estriado (relacionado con la actividad motora de ajuste fino) y la médula espinal. Pero, en condiciones normales, las células que no están en el hipocampo ni en el sistema olfatorio no parecen producir nuevas neuronas.

Imaginemos que la parte frontal del cerebro del animal fuera transparente. En ese caso, la circunvolución dentada del hipocampo se vería en parte formando una capa delgada y oscura, que dibujaría una V. Esa estructura se corresponde con los cuerpos celulares de las neuronas granulosas, la parte globular que contiene el núcleo. Dentro de la V, la capa adyacente integra el hilio (hilus), constituido por axones de las células granulosas, esto es, por las largas proyecciones que transportan las señales a la estación de relevo del hipocampo, la CA3.

Las células madre de las que proceden las células granulosas recién formadas residen en la frontera entre la circunvolución dentada y el hilio. Estas células se dividen sin cesar. Buena parte de la progenie es vivo retrato de las células originales; no pocas mueren en seguida. Pero hay algunas que emigran y se internan en la capa de células granulosas; adoptan el aspecto de las células granulosas circundantes, que rematan con proyecciones múltiples para recibir y enviar señales. También extienden sus axones a lo largo de las mismas vías usadas por sus vecinas ya establecidas.

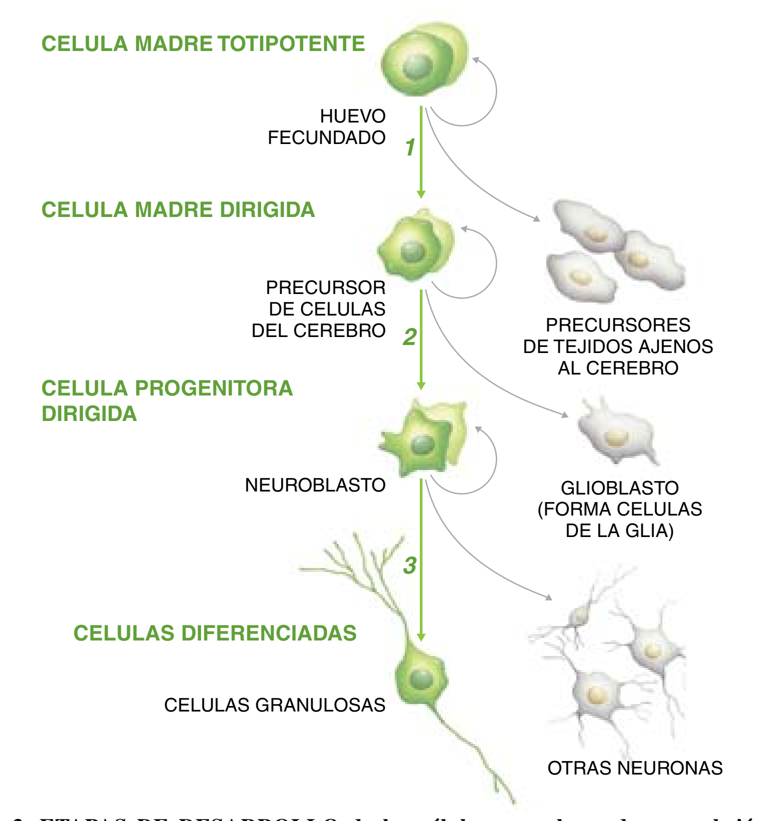
Las células madre que rinden nuevas neuronas del sistema olfatorio tapizan las paredes de los ventrículos laterales, cavidades cerebrales llenas de fluido. El equipo de Arturo Alvarez-Buylla, de Rockefeller, ha demostrado que hay descendientes de estas células madre que emigran hasta llegar al bulbo olfatorio, donde adquieren las características propias de las neuronas del contorno.

En ambas regiones cerebrales, las nuevas neuronas formadas remedan en su apariencia a las compañeras preestablecidas. Cabe suponer que cumplan parejos cometidos. ¿Cómo saberlo? Para desentrañarlo, ha resultado de notable valor el trabajo realizado sobre los efectos del medio ambiente operados en la anatomía del cerebro y en el aprendizaje.

A comienzos de los años sesenta, el grupo encabezado por Mark R. Rosenzweig, de Berkeley, modificó las condiciones habituales de laboratorio, un tanto monacales, de una serie de roedores para colocarlos en un entorno de mayor bienestar, con jaulas mejores y en compañía de otros. Se les dejaba explorar los alrededores (cambiados de forma constante por los cuidadores) y divertirse con ruedas giratorias y otros juguetes.

El grupo de Rosenzweig y, más tarde, el de William T. Greenough, de Illinois, describieron los resultados de vivir en condiciones tan relajadas. Comparados con los animales alojados en las jaulas habituales, los que disfrutaron una vida mejor mostraban al final algo más de masa cerebral, mayor grosor de algunas estructuras cerebrales, diferencias en los niveles de ciertos neurotransmisores (las moléculas que portan mensajes activadores o inhibidores de una neurona a otra), más conexiones entre las células nerviosas y una ramificación aumentada de las proyecciones neuronales. Además, realizaron mejor las pruebas de aprendizaje; por ejemplo, la de moverse con soltura por el laberinto.

Considerados en su conjunto, los resultados abonaban la idea de que los cambios ambientales mejoraron la función cerebral. Desde entonces los neurobiólogos están convencidos de que el bienestar del entorno de los roedores adultos incide en la arquitectura cerebral y potencia su capacidad. Pese a todo, se rechazó durante años la hipótesis de que la producción de células nerviosas nuevas en cerebros adultos tuviera nada que ver con semejante reordenación, por mucho que ya en 1964 Altman aconsejara su consideración.



3. ETAPAS DE DESARROLLO de las células granulosas de un embrión. Se parte de una célula madre totipotente, capacitada para dar lugar a cualquier célula del cuerpo. La prole inicial cuenta con células madre sin diferenciar cuya misión consiste en producir células madre del cerebro (*1*). Estas darán lugar, a su vez, a "células progenitoras" destinadas a producir sólo neuronas (*2*) o sólo células de la glía, que estimulan la supervivencia neuronal. De los progenitores neuronales proceden células granulosas del hipocampo (*3*) u otros tipos de neuronas en cualquier otra parte del cerebro. Las etapas segunda y tercera se suceden en el hipocampo humano durante toda la vida del ser humano.



En ayuda de la tesis ambientalista han llegado nuevos descubrimientos. Con técnicas desconocidas en los años sesenta, nuestro grupo demostró en 1997 que los ratones adultos que han gozado de unas condiciones de bienestar desarrollan un 60 % más de células granulosas adultas en la circunvolución dentada que los individuos control, idénticos en genética. Los primeros sacaron también un mejor rendimiento en una tarea de aprendizaje que consistía en salir de la piscina. El bienestar potenció la neurogénesis y el aprendizaje incluso en ratones muy viejos, cuya producción basal de neuronas está muy por debajo de la tasa juvenil.

No estamos afirmando, en absoluto, que las nuevas neuronas sean las únicas responsables del mejor comportamiento. Los cambios en la configuración de la estructura y el microambiente químico en las áreas cerebrales relacionadas desempeñan también un papel destacado. Mas, por otro lado, sería llamativo que un cambio tan radical en la fabricación de neuronas, así como la conservación de la neurogénesis en adultos a través de la evolución, no sirvieran para nada.

Si, como sospechamos, las neuronas que brotan de modo rutinario en el cerebro humano adulto son funcionales, los neurobiólogos podrían estudiar los controles que regulan su formación con el propósito último de promover la generación de neuronas doquiera se necesiten. Amén de la mejora del entorno, se han identificado otros factores que inciden en la neurogénesis.

Para entenderlos en su justa medida, habrá que recordar las diversas etapas de la neurogénesis, desde la proliferación de células madre hasta la diferenciación, pasando por la selección de determinadas supervivientes de alguna progenie y la migración. Ahora bien, los factores que intervienen en una etapa podrían no influir en otras. El incremento de la proliferación de células madre puede comportar el aumento neto de neuronas nuevas, si la supervivencia y la diferenciación de las células hijas se mantiene constante. Pero si las tasas de supervivencia y diferenciación se modificaran en sentido opuesto, quizá no aumentase la cifra de neuronas. En el mismo rango, el número de neuronas crecerá si la proliferación se mantiene constante, pero aumentan la supervivencia y diferenciación.

Entre las influencias reguladoras descubiertas, algunas se consideran contrarias a la neurogénesis. A tenor de los trabajos de Gould y McEwen, determinados estímulos comunes sobre la circunvolución dentada podrían revestir un franco interés contra la producción de neuronas. Así, los neurotransmisores que estimulan las células granulosas en el giro dentado inhiben también la proliferación de células madre en el hipocampo. Los niveles elevados de hormonas glucocorticoides en la sangre bloquean la neurogénesis en adultos.

Sabido esto, no encierra mayor sorpresa que el estrés reduzca la producción de células madre en la región aludida. El estrés potencia, en el cerebro, la liberación de neurotransmisores excitadores; en las suprarrenales, la secreción de hormonas glucocorticoides. Si conociéramos el mecanismo de la inhibición podríamos evitarla. Pero andamos muy lejos de ello. El hecho de que niveles desmesurados de neurotransmisores excitadores y de ciertas hormonas bloqueen la neurogénesis, por ejemplo, no implica necesariamente que niveles menos extremos sean nocivos; incluso podrían ser útiles.

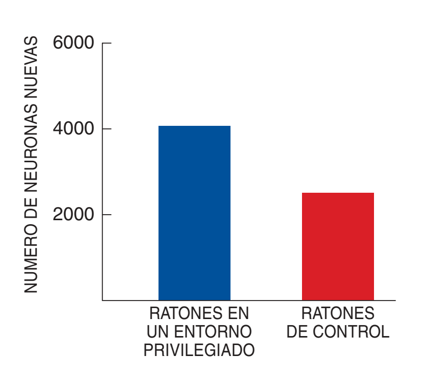
En lo concerniente a los factores que estimulan la neurogénesis en el hipocampo, nos proponemos identificar qué aspectos de un entorno acogedor ejercen mayor efecto. El grupo de Gould ha demostrado que la participación en una tarea de aprendizaje, incluso sin las condiciones de bienestar, potencia la supervivencia de las células generadas por división de células madre, lo que se traduce en una multiplicación neta del número de nuevas neuronas.

En nuestro grupo comparamos el proceso de neurogénesis en dos grupos de ratones instalados en sendas jaulas normalizadas; una disponía de rueda giratoria, la otra no. Los ratones con acceso ilimitado a la rueda se ejercitaron en ella y terminaron con el doble de neuronas nuevas que sus sedentarios compañeros; esta proporción es similar a la observada con ratones alojados en un entorno de bienestar. En el grupo de los corredores, el incremento de la división de las células madre fue responsable de una parte importante del efecto final, pero no intervenía en las ganancias obtenidas por ratones de un entorno de bienestar. En este último caso, lo mismo que en el estudio de Gould, las condiciones mejoradas promovían la supervivencia de la progenie de células madre; pervivían un mayor número para convertirse en neuronas. Nos reitera este descubrimiento que los mecanismos reguladores de la neurogénesis son complejos y operan en diversos planos.

De ciertas moléculas se sabe que influyen en la neurogénesis. Hemos sometido a criba el factor de crecimiento epidérmico y el factor de crecimiento de fibroblastos. No obstante su denominación, inciden en el desarrollo de neuronas en cultivos celulares. Junto con H. Georg Kuhn, de Salk, y Jürgen Winkler, de San Diego, inyectamos estos compuestos en los ventrículos laterales de ratas adultas; allí mostraban una notable proliferación merced a las células madre locales. El factor de crecimiento epidérmico favoreció la diferenciación de las células en glía, dentro del bulbo olfatorio; pero el factor de crecimiento de fibroblastos estimuló la producción de neuronas.

La inducción de crisis epilépticas, accidentes cerebrovasculares y otros estados patológicos en animales adultos desencadena la división de





4. SUPERIORIDAD DEL ENTORNO DE BIENESTAR (*página opuesta*) sobre las condiciones habituales de laboratorio (*arriba*) a la hora de estimular la neurogénesis en la circunvolución dentada del hipocampo de ratones (*gráfico*). Se busca qué aspectos de este ambiente privilegiado inciden con mayor determinación. Los resultados de la comparación entre animales que viven en jaulas estándar con otros cuya jaula además dispone de una rueda giratoria indican que el ejercicio desarrollado en la rueda podría ser un factor importante.

las células madre e incluso la neurogénesis. Ignoramos si el cerebro apela a este tipo de respuesta para reponer las neuronas necesarias. En el caso de las crisis, las conexiones aberrantes formadas por las neuronas nuevas podrían ser parte del problema. La división de células madre y la neurogénesis revelan que el cerebro tiene capacidad autorreparadora. ¿Por qué, pues, no emplea con regularidad dicho potencial?

En todos los experimentos referidos, se han examinado los fenómenos de regulación manteniendo constante la dotación genética. Observábamos las respuestas neurológicas de animales genéticamente idénticos ante estímulos distintos. Otra manera de desentrañar los controles de la neurogénesis consistiría en abordar, dejando constante el entorno, los genes de cepas de animales que difieran en su rendimiento neuronal. Entre los genes divergentes había, cabe presumirlo, los involucrados en la producción de nuevas células nerviosas. En la misma línea, se comparan también genes activos en distintas regiones cerebrales, según presenten neurogénesis o no. La investigación genética está en marcha.

Los genes sirven de patrón para la síntesis de las proteínas. Son éstas las que llevan el peso de la actividad celular, vale decir, de la inducción de la división celular, la migración o la diferenciación. Por ello, si pudiéramos identificar los genes que participan en la fabricación de neuronas, estaríamos en el camino de descubrir las proteínas asociadas y establecer la contribución de esos genes y sus proteínas al proceso neurogenético.

Con diligente tenacidad podríamos recorrer la trayectoria de las cascadas moleculares que llevan de un estímulo específico, sea ambiental o interno, a alteraciones particulares de la actividad genética y, a su vez, a una intensificación o disminución de la neurogénesis. Se dispondría así de la información necesaria para inducir a voluntad la regeneración neuronal. Este enfoque clínico podría traducirse en la administración de moléculas reguladoras, u otros agentes farmacológicos, en la aplicación de terapia génica para aportar moléculas útiles, en el trasplante de células madre, modulación de estímulos ambientales o cognitivos y alteraciones de la actividad física.

El desarrollo de las técnicas de ese tenor quizá requiera decenios. Una vez dominadas, sin embargo, podrían aplicarse con amplia versatilidad. Podría quizás alcanzarse con ellas cierto grado de reparación en áreas cerebrales con neurogénesis conocida y en zonas donde las células madre se hallen en reposo. Podría el médico inducir el traslado migrador de células madre hacia zonas donde no suelen recalar, promoviendo su maduración en el tipo específico de células nerviosas que demanda el paciente. Aunque las nuevas células no podrían regenerar partes completas del cerebro ni reparar pérdidas de memoria, sí podrían, por contra, sintetizar cantidades importantes de dopamina (el neurotransmisor cuya carencia provoca los síntomas del Parkinson) u otras sustancias.

La investigación en dominios próximos de la ciencia facilitará la búsqueda de enfoques terapéuticos avanzados. En algunos laboratorios se cultivan células madre embrionarias humanas: un tipo celular muy versátil, derivado de embriones en fase precoz de desarrollo y capaz de producir cualquier tipo celular en el cuerpo humano. Es posible que llegue el día en que se coloquen células madre embrionarias en un embrión para producir un determinado linaje de neuronas. Células que se trasplantarían luego a regiones dañadas para suplantar la pérdida de células nerviosas.

Los trasplantes podrían ser rechazados por el sistema inmunitario del receptor. Para orillar ese obstáculo se exploran varias vías. Una solución podría consistir en cultivar células madre del cerebro del paciente que las ha de recibir, e intervenir en dicho material según el fin deseado, en vez de utilizar células madre de un donante. Se han diseñado ya medios bastante inocuos para extraer tales células cerebrales.

Cierto es que nos movemos aún en el terreno de la pura especulación. En el de un horizonte que nos lanza un desafiante reto. En algún momento del estudio de los controles de la neurogénesis y de los tratamientos propuestos para los trastornos cerebrales, se tendrá que sustituir a los roedores por humanos. Para estudiar a personas sin afectar su salud, habrá que recurrir a protocolos extremadamente refinados, del tenor de las técnicas de formación de imágenes (resonancia magnética funcional o tomografía de emisión de positrones). Habrá que desarrollar mecanismos de seguridad para que las neuronas trasplantadas o cuya formación se estimule en el mismo cerebro humano hagan lo que se espera de ellas y no interfieran en la función cerebral normal. Los beneficios esperados del aprovechamiento del potencial regenerativo del cerebro justifican todos los esfuerzos.

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

NEUROGENESIS IN THE ADULT HUMAN HIPPOCAMPUS. Peter S. Eriksson *et al*. en *Nature Medicine*, vol. 4, n.º 11, págs. 1313-1317; noviembre 1998.

LEARNING ENHANCES ADULT NEUROGENESIS IN THE HIPPOCAMPAL FORMATION. Elisabeth Gould *et al*. en *Nature Neuroscience*, vol. 2, n.º 3, págs. 260-265; marzo 1999.

RUNNING IN CRISIS CELL PROLIFERATION AND NEUROGENESIS IN THE ADULT MOUSE DENTATE GYRUS. Henriette van Praag *et al*. en *Nature Neuroscience*, vol. 2, n.º 3, págs. 266-270; marzo 1999.

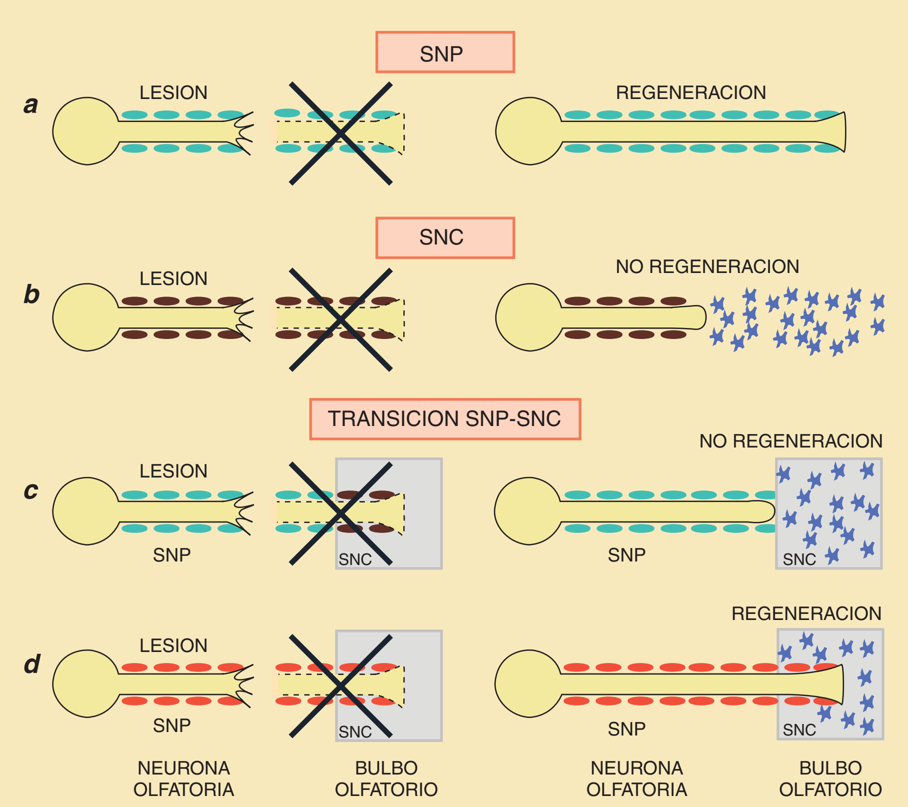
Regeneración de la médula espinal

La glía envolvente como instrumento favorecedor

El sistema nervioso interviene en los procesos de la percepción, pensamiento y control de nuestro organismo. Para llevar a cabo estas funciones, las neuronas del sistema nervioso periférico (SNP) recogen información del cuerpo y del exterior, que transmiten a las neuronas de la médula espinal y tronco del encéfalo, situados en el sistema nervioso central (SNC). Las neuronas de estas estructuras contactan con otras del SNC, hasta que la información llega al cerebro, donde se procesa para emitir una respuesta o queda almacenada.

Las órdenes generadas por el cerebro viajan a los órganos efectores siguiendo la ruta inversa, hasta alcanzar los músculos o las estructuras correspondientes. El sistema nervioso constituye, pues, una suerte de potente conductor formado por multitud de cables (los axones) que transmiten impulsos eléctricos hacia el cerebro (vías ascendentes), así como órdenes del cerebro a órganos efectores (vías descendentes).

Cuando el sistema nervioso sufre una agresión, se interrumpen las vías nerviosas en el lugar de la lesión y ya no se pueden transmitir impulsos eléctricos. A principios de siglo, Santiago Ramón y Cajal había observado que los SNP y SNC de mamíferos adultos no respondían igual ante las lesiones. Mientras que los axones del SNP dañados podían regenerarse y reconectarse con las estructuras a las que inervaban antes de la lesión, los axones del SNC que sufrían una agresión se mostraban incapaces de crecer, quedando interrumpida permanentemente la vía nerviosa lesionada. Del mismo modo, si la lesión del nervio afectaba a la zona de transición entre el SNP y SNC, los axones podían regenerarse en el tramo de nervio situado en el SNP, mientras que eran incapaces de penetrar y crecer dentro del SNC.



1. Las neuronas responden de manera diferente a las lesiones en el sistema nervioso periférico (SNP) y en el sistema nervioso central (SNC). En ambos casos, tras una lesión se produce una degeneración de la parte del axón alejada del cuerpo celular (aspa) *y un intento de la neurona de regenerar su axón. Los axones lesionados en el SNP son capaces de regenerarse* (a), *pero no los axones lesionados en el SNC* (b). *Los axones lesionados en la transición SNP-SNC se regeneran en el tramo de SNP, aunque son incapaces de crecer dentro del sistema nervioso central* (c). *Sí es posible la regeneración en el bulbo olfatorio* (d). *Los axones olfatorios lesionados regeneran tanto en el tramo de SNP como dentro del SNC (bulbo olfatorio) debido a que la glía envolvente los rodea, los aísla del entorno propio del SNC y favorece su regeneración. (Verde: células de Schwann; marrón: oligodendroglía; rojo: glía envolvente; azul: cicatriz glial; gris: SNC.)*

La diferente capacidad regenerativa de los SNP y SNC se debe a la existencia de un entorno celular distinto en ambos. En el sistema periférico, los axones están rodeados por células de Schwann, que producen las moléculas necesarias para que esos cilindroejes o axones puedan crecer. En el sistema central, sin embargo, las células de glía (oligodendroglía, astroglía y microglía) constituyen un obstáculo para la regeneración de los axones, pues crean un entorno no permisivo para su extensión.

Por una parte, ciertas proteínas asociadas a la mielina y sintetizadas por la oligodendroglía hacen que la sustancia blanca del SNC sea inhibidora del crecimiento axonal. Por otra, la astroglía y la microglía forman una cicatriz en el lugar de la lesión que impide también la elongación de axones.

De esa regla general se aparta el bulbo olfatorio, una estructura del SNC, donde la regeneración axonal es posible a lo largo de toda la vida del individuo. En esta región del sistema nervioso central, los axones de las neuronas olfatorias seccionados se regeneran y restablecen la integridad histológica y funcional del sistema.

Una diferencia notable entre el bulbo olfatorio y el resto del SNC radica en la presencia de la glía envolvente en aquél. La glía envolvente es un tipo de célula glial que rodea a los axones olfatorios en todo su recorrido, aislándolos así del entorno no permisivo propio del SNC. Según parece, estas células aportan a los axones

las moléculas que requieren para su crecimiento.

La ausencia de regeneración axonal en el SNC lesionado causa la pérdida permanente de las funciones. En el caso de la médula espinal, no se puede transmitir la información recogida por el SNP al cerebro (ascendente), ni las órdenes motoras generadas por el cerebro a los músculos (descendente), provocando una pérdida de la sensibilidad y una parálisis por debajo del nivel de la lesión.

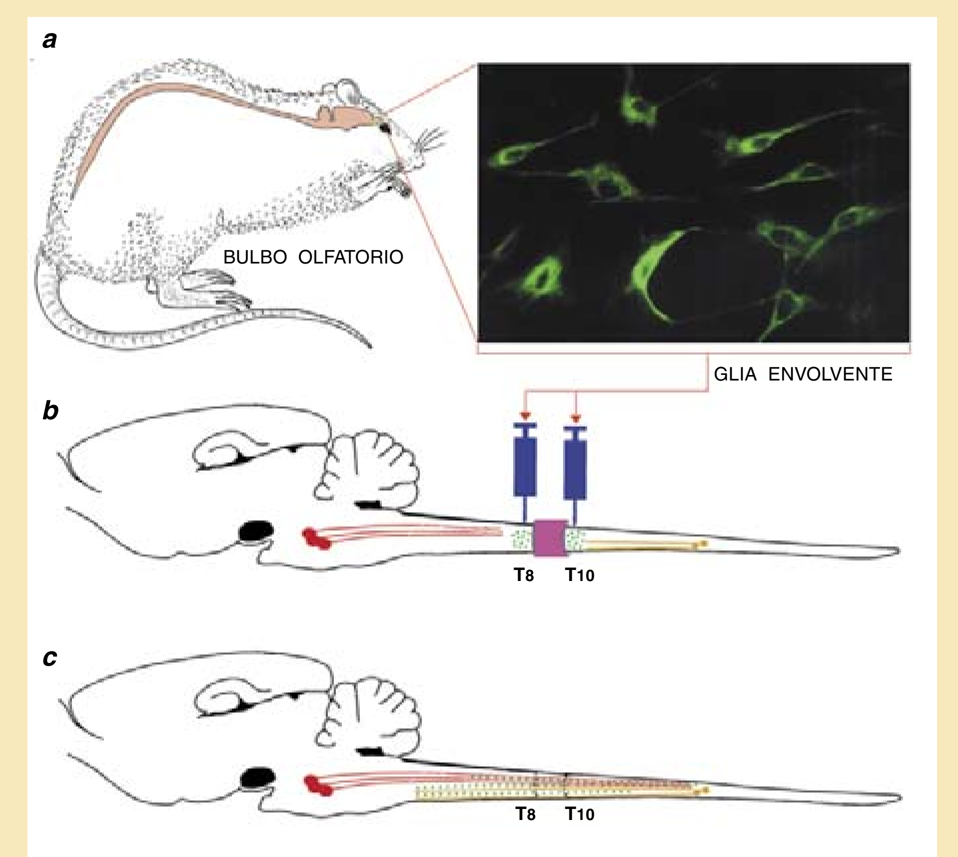
La prevalencia de lesiones medulares y sus consecuencias devastadoras para los pacientes que las sufren han instado la búsqueda de una estrategia experimental que permita a los axones lesionados crecer dentro del SNC. Los resultados obtenidos en animales de laboratorio podrían ayudar a encontrar un tratamiento eficaz en personas. La mayoría de las estrategias experimentales empleadas responden a una misma idea básica: proporcionar al axón lesionado el entorno adecuado que necesita para su elongación.

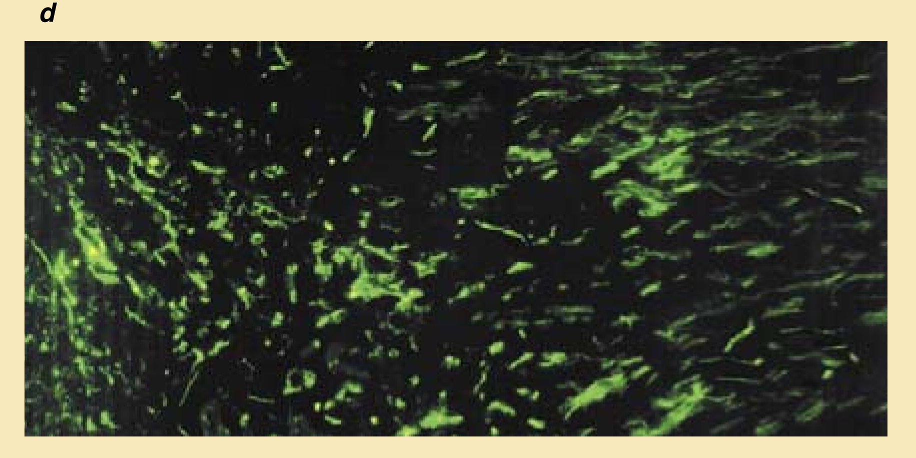
Se han colocado en el lugar de la lesión injertos de tejido nervioso embrionario, de nervio periférico, infusiones de factores neurotróficos y moléculas de adhesión, trasplantes de células de Schwann, trasplantes de células modificadas genéticamente para producir moléculas favorecedoras del crecimiento axonal, etcétera.

Aunque los axones medulares lesionados crecieron dentro de los múltiples entornos permisivos implantados, fueron incapaces de salir de ellos y no pudieron regenerarse en el entorno inhibidor del SNC. Este hecho impidió que se pudiera restablecer la integridad histológica perdida y, por tanto, la función del sistema dañado.

Se han conseguido mejores resultados empleando anticuerpos bloqueantes de la actividad inhibidora de la mielina, que promueven el crecimiento axonal en médulas espinales lesionadas de forma incompleta o parcial (hemisección medular o lesión específica del haz corticoespinal). Mas sólo se consiguió la regeneración, en escasa longitud, de muy pocos axones; probablemente, los anticuerpos empleados no bloqueaban la actividad inhibidora de la cicatriz glial.

Hemos obtenido resultados muy prometedores en ratas adultas mediante trasplantes de glía envolvente del bulbo olfatorio. La estrategia se aplicó en médulas espinales enteramente seccionadas. Tras cultivar y purificar la glía envolvente, a partir de bulbos olfatorios de ratas adultas, trasplantamos los cultivos puros en médulas espinales de otras ratas adultas, a las cuales se les había extraído el segmento medular T9 completo (lesión tipo traumático). La glía envolvente se





2. Los trasplantes de glía envolvente promueven la regeneración axonal en médulas espinales seccionadas de ratas adultas. La glía envolvente se obtiene de los bulbos olfatorios de ratas adultas, se cultiva y se purifica (a). *En la foto de la derecha se muestra un cultivo de glía envolvente pura observada en un microscopio de fluorescencia. Los cultivos de glía envolvente pura se trasplantan en médulas espinales en las que se eliminó por sección el segmento T9* (b), *con la consiguiente interrupción de todos los axones descendentes* (rojo) *y ascendentes* (ocre). *La glía envolvente* (puntos verdes) *se inyecta en los muñones medulares a ambos lados de la lesión (segmentos T8 y T10). Para unir los muñones y rellenar el hueco creado al quitar el segmento T9 se usa un tubo relleno de células de Schwann* (rosa). *Seis semanas después del trasplante, los axones descendentes de neuronas del tronco del encéfalo* (rojo) *y los axones ascendentes de neuronas espinales* (ocre) *atraviesan el lugar de la lesión y se regeneran bastante trecho en los muñones medulares* (c). *La glía envolvente migra del lugar de inyección y acompaña a los axones en regeneración* (puntos verdes). *En la microfotografía de una sección histológica de una médula espinal trasplantada con glía envolvente, se distinguen axones en regeneración por la zona del corte* (d)

inyectó en los muñones medulares y entre los muñones se tendió un tubo relleno de células de Schwann, en sustitución del segmento medular eliminado. Pasadas seis semanas del trasplante, varios de los axones medulares seccionados habían regenerado.

Los axones ascendentes de neuronas espinales salieron del tubo regenerando como mínimo una distancia de 2,5 centímetros dentro de la médula espinal. Los axones descendentes de neuronas del rafe (tronco del encéfalo) regeneraron fuera del tubo y dentro de la médula espinal una distancia de al menos 1,5 centímetros. Los axones ascendentes y los descendentes crecieron en los entornos inhibidores de la cicatriz glial y de la sustancia blanca. La glía envolvente migró del lugar de la inyección invadiendo ambos muñones medulares y acompañó a los axones en regeneración en su recorrido dentro de la médula espinal. Es probable que estas células estuvieran aportando las condiciones que los axones necesitan para su regeneración.

Mediante el trasplante de glía envolvente hemos conseguido que los axones se regeneren en médulas espinales seccionadas. Se dispone, además, de un injerto que migra del lugar donde se implantó acompañando a los axones en regeneración a través de entornos inhibidores y creando a su alrededor las condiciones necesarias para que puedan crecer.

Estos hallazgos constituyen un primer paso previo y necesario para que se pueda producir el restablecimiento de los circuitos neuronales dañados y una posterior recuperación de las funciones perdidas tras la lesión. Sin regeneración nerviosa difícilmente se podría producir una recuperación funcional.

Aunque aún queda mucho por hacer antes de que estos resultados puedan tener una aplicación clínica, lo conseguido arroja nueva luz sobre el problema de la regeneración nerviosa y abre una nueva ventana de esperanza para el tratamiento de la parálisis y de aquellas patologías del sistema nervioso que requieran de crecimiento axonal para su curación.

ALMUDENA RAMÓN CUETO
Centro de Biología Molecular
"Severo Ochoa", Madrid

TSUNAMIS

No es posible domeñar su energía, pero las lecciones aprendidas de los desastres ocurridos en estos últimos diez años, junto con los avances en el seguimiento de estas olas imponentes, nos ayudarán a salvar vidas

Frank I. González

Apenas habían pasado doce minutos de la puesta del Sol. Había empezado a oscurecer en la costa norte de Papúa Nueva Guinea. Aquella noche del viernes 17 de julio de 1998 llegaba tranquila para los hombres, mujeres y niños de Sissano, Arop, Warapu y otras aldeas del apacible banco de arena que separa del mar de Bismarck la laguna de Sissano. Mientras, en las profundidades de la Tierra, lejos de los habitantes de las cabañas, donde tremendas fuerzas habían comprimido las rocas subyacentes durante años, en pocos minutos, se liberó, con suma violencia, toda la energía acumulada, hasta provocar un terremoto de 7,1 grados de magnitud. A las 18,49 horas, el temblor más intenso sacudió, en una extensión de 30 kilómetros, el litoral de la laguna y deformó el fondo costero oceánico. El nivel del mar, en respuesta, subió de repente y engendró un temible tsunami.

John Sanawe, un coronel retirado, vivía en el extremo sur del banco de arena, en Arop. Sobrevivió al tsunami y le contó su peripecia personal a Hugh Davies, de la Universidad de Papúa Nueva Guinea. Tras la primera sacudida, ocurrida a sólo 20 kilómetros de la costa, Sanawe vio la elevación del mar sobre el horizonte; el agua, pulverizada, rozaba los 30 metros de altura. Oyó un ruido bronco, al principio como de un trueno lejano y después parecido al de un helicóptero cercano; el sonido se fue apagando, mientras retrocedía el nivel del mar muy por debajo de su cota normal. Pasaron cuatro o cinco minutos de silencio. Oyó entonces un



estruendo de reactor en vuelo rasante. Y de pronto, la primera ola del tsunami, de unos tres o cuatro metros de altura. Corrió hacia su casa, pero la ola lo alcanzó. Una segunda ola, mucho mayor, arrasó la aldea y lo arrojó un kilómetro más allá, hasta el manglar interior de la laguna.

Otros no tuvieron la suerte de Sanawe. Algunos fueron despedidos más allá de la laguna, lanzados sobre las ramas rotas del manglar. Muchos recibieron golpes continuos de toda clase de escombros. De los que sobrevivieron, una treintena perdió alguna extremidad gangrenada. Antes de que llegara la ayuda, cocodrilos y perros salvajes carroñearon los cadáveres, circunstancia que dificultó, aún más, el recuento de víctimas mortales. Se cifran en unas 2200; de ellas, 230 eran niños. Las olas de más de 15 metros de altura, que alcanzaron la costa un cuarto de hora después de la sacudida principal, sorprendieron a muchos habitantes. Los pocos enterados sobre los riesgos de tsunami quedaron atrapados sin saber adónde huir.

1. LOS TSUNAMIS DE ESPECIAL VIOLENCIA podrían arrancar un faro de cuajo, tal y como se lo imaginó el artista. Sería imposible escapar de estas olas, muy próximas a la costa, con alturas de hasta 30 metros y velocidades de 15 metros por segundo.

Peor de lo que se esperaba

Papúa Nueva Guinea

17 de julio de 1998
Altura máxima de la ola: 15 metros
Víctimas mortales: más de 2200



La zona de Sissano cuatro días después del tsunami. Las marcas señalan la localización de las estructuras arrasadas.

Devastado por tres monstruosas olas, y convertido en yermo banco de arena de la costa septentrional de Papúa Nueva Guinea, Sissano había estado densamente poblado. Inesperadamente, un temblor de magnitud moderada, 7,1, provocó olas propias de terremotos más fuertes. Ante ese manifiesta discrepancia, se especuló con la posibilidad de que las vibraciones provocadas por el terremoto desencadenaran otras perturbaciones en el fondo marino, tales como el desprendimiento de vertientes o la explosión de hidratos gaseosos, que alimentaran la energía del tsunami.

Esas olas inesperadas y gigantescas han causado muchas catástrofes; piénsese en la sufrida por Nicaragua en 1992. Hasta ahora, sin embargo, no se habían llevado a cabo campañas intensivas de estudio del fondo marino para resolver su misterio. A principios de este año, dos equipos rastrearon el fondo del mar en Papúa Nueva Guinea, buscando señales de movimientos de vertientes submarinas. Estos equipos, junto con Takeshi Matsumoto, del Centro de Ciencia e Investigación Marina del Japón, y David Tappin, de la Comisión de Geofísica Aplicada del Pacífico Sur, identificaron una pequeña depresión submarina que parecía ser producto de un movimiento de vertientes. Habrá que averiguar ahora si se trata de un rasgo reciente o producto de un antiguo terremoto. *—F.G.*

Las olas de los tsunamis que han afectado a Papúa Nueva Guinea son las más devastadoras que se conocen, según los registros de incidencia obtenidos a partir de las bases de datos desarrolladas por James F. Lander, Patricia A. Lockridge y su grupo del Cetro Nacional de Datos Geofísicos de Boulder, así como por Viacheslav K. Gusiakov y sus colegas del Laboratorio de Tsunamis de Novosibirsk. La mayoría de los tsunamis reseñados se dan en el océano Pacífico, el 86 por ciento de los cuales se generan por los terremotos submarinos originados alrededor de la Fosa Pacífica, donde la colisión entre las placas tectónicas favorece una intensa actividad sísmica.

Desde 1990 se han registrado en el mundo 82 tsunamis. Se han cobrado la vida de 4000 personas; una tasa mucho más alta que la media histórica de 57 por década. Este incremento en los registros obedece en buena medida a la mejora en las comunicaciones y al crecimiento de las poblaciones litorales. Con mi grupo del Laboratorio Oceanográfico del NOAA en Seattle, establecimos una red de correo electrónico para la colaboración entre expertos y la creación de registros, rápidos y precisos, de información sobre tsunamis. Esta iniciativa de intercomunicación, gestionada ahora por el Centro Internacional de Información sobre Tsunamis, ha venido facilitando el intercambio de conocimientos desde el episodio de Nicaragua de 1992.

En el pasado, fenómenos similares a los de Nicaragua y Papúa Nueva Guinea causaron estragos en Hawai y Alaska. Ello no obstante, se creyó durante mucho tiempo que la costa oeste de Estados Unidos se hallaba libre de episodios devastadores. Pero comienzan a aflorar pruebas de que, a lo largo de la subducción de Cascadia, donde parte de la corteza oceánica de la placa del Pacífico se sumerge bajo Norteamérica, los terremotos pueden provocar tsunamis a intervalos de 300 a 700 años. El terremoto de abril de 1992, de 7,1 grados de magnitud, producido en el extremo sur de la zona de subducción y desencadenante de un pequeño tsunami cerca de Cabo Mendocino (California), fue un claro aviso del riesgo. E instó el desarrollo sistemático de un programa de previsión de los tsunamis más peligrosos para la población. Trabaja en ese empeño mi laboratorio de Seattle.

Para comprender el fenómeno de los tsunamis hemos de empezar por separarlo de mareas y olas de origen

eólico. Las brisas que recorren el océano rizan su superficie en olas de corta longitud de onda y forman corrientes superficiales; hasta un buceador puede evitarlas sumergiéndose a mayor profundidad. Y si bien es cierto que algunas tempestades levantan un fuerte oleaje, de hasta 30 metros de altura, no afecta a las aguas más profundas.

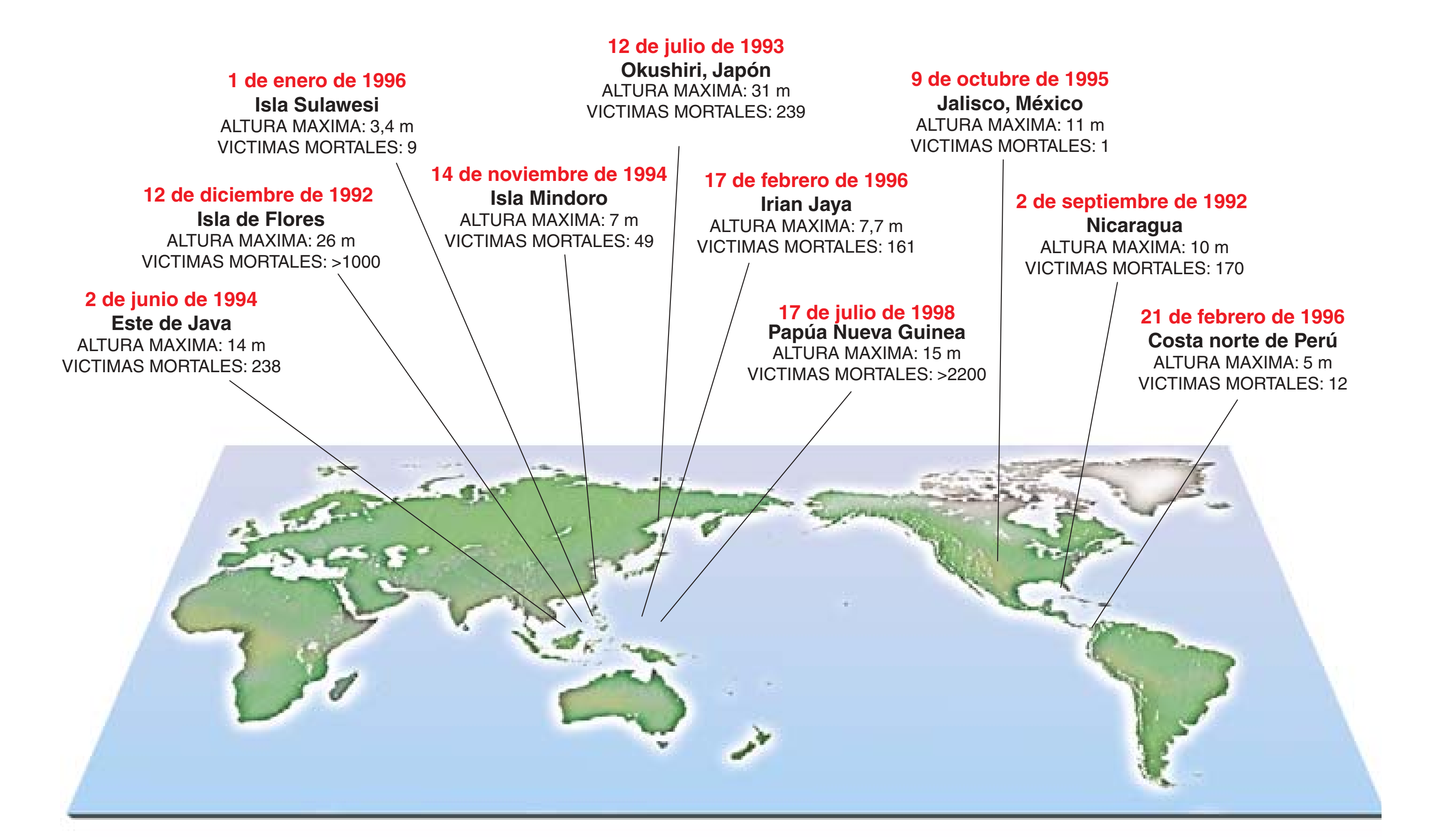
Las mareas, que se suceden dos veces al día, generan, igual que los tsunamis, corrientes que llegan hasta el fondo del mar; mas, a diferencia de ellos, dependen de la atracción gravitatoria de la Luna y el Sol. Los tsunamis, en cambio, débense a perturbaciones sufridas por el fondo oceánico como terremotos, erupciones volcánicas, impactos de meteoritos o desprendimientos de tierras. Con una velocidad de desplazamiento superior a los 700 kilómetros por hora en las mayores profundidades, el tsunami puede igualar la celeridad de un Boeing 747. Pese a ello, no resulta peligroso en las aguas más profundas, donde las olas pasan inadvertidas, pues alcanzan alturas de pocos metros y largas longitudes de onda, en ocasiones superiores a los 750 kilómetros en mar abierto. La palabra japonesa *tsu-nami* significa en su literalidad "ola escondida" debido, probablemente, a que un tsunami puede avanzar por el océano, raudo e imperceptible y, ya en la costa, emerger de repente transformado en olas gigantescas y devastadoras.

Un tsunami puede recorrer largas distancias y transportar su destructiva energía desde su origen hasta costas situadas a miles de kilómetros. Por su ubicación, en medio del océano, las islas Hawai son especialmente vulnerables a los tsunamis del Pacífico; desde 1895 han sufrido ya en doce ocasiones sus terribles efectos. En el más devastador, que se supone fue el de 1946, murieron 159 personas; aquellas olas gigantescas se habían generado a casi 3700 kilómetros de distancia, en las islas Aleutianas de Alaska. Si bien esos tsunamis creados en tamaña lejanía emergen de repente, los desencadenados a poca distancia de la costa, y de generación inmediata, como el del año 1998 en Papúa Nueva Guinea, ejercen efectos aún más devastadores. Lander ha estimado que el 90 por ciento de las víctimas se dan en un radio de 200 kilómetros en torno al punto de generación. Un ejemplo extremo son las 30.000 muertes causadas por el tsunami provocado a raíz de la erupción del Krakatoa en 1883, todas ellas a 120 kilómetros del punto de su generación. (El volcán está en el estrecho indonesio de la Sonda.) La explosión levantó olas de la altura de un edificio de doce plantas.

Cualquiera que sea su origen, los tsunamis evolucionan en tres fases, correspondientes a otros tantos procesos físicos: generación por fuerzas que perturban la columna de agua, propagación desde las aguas profundas próximas al origen de la perturbación hasta las aguas someras de la costa y, finalmente, inundación de las tierras. La fase de propagación es la que mejor se conoce, mientras que las de generación e inundación resultan más difíciles de simular por ordenador. Para prever dónde se originarán futuros tsunamis, importa que las simulaciones sean muy precisas; ello permitirá dirigir los recursos y medios de rescate hacia las regiones consideradas de mayor riesgo.

Llámase generación el proceso en cuya virtud una perturbación del fondo marino (el movimiento a lo largo de una falla, por ejemplo) convierte la superficie del mar en un tsunami. Los simuladores parten del supuesto según el cual el desplazamiento de la superficie marina es igual al sufrido por el fondo oceánico,

2. DESDE 1990 diez tsunamis devastadores se han cobrado la vida de más de 4000 personas. La catástrofe del año pasado en Papúa Nueva Guinea es la más reciente de esta serie de olas asesinas generadas por terremotos a lo largo de la fosa tectónica del Pacífico.



Un temblor, lento, silencioso y mortal

Nicaragua

2 de septiembre de 1992
Altura máxima de la ola: 10 metros
Víctimas mortales: 170



Los supervivientes forman cola ante el reparto de víveres.



Un pueblo costero el día después de la catástrofe.

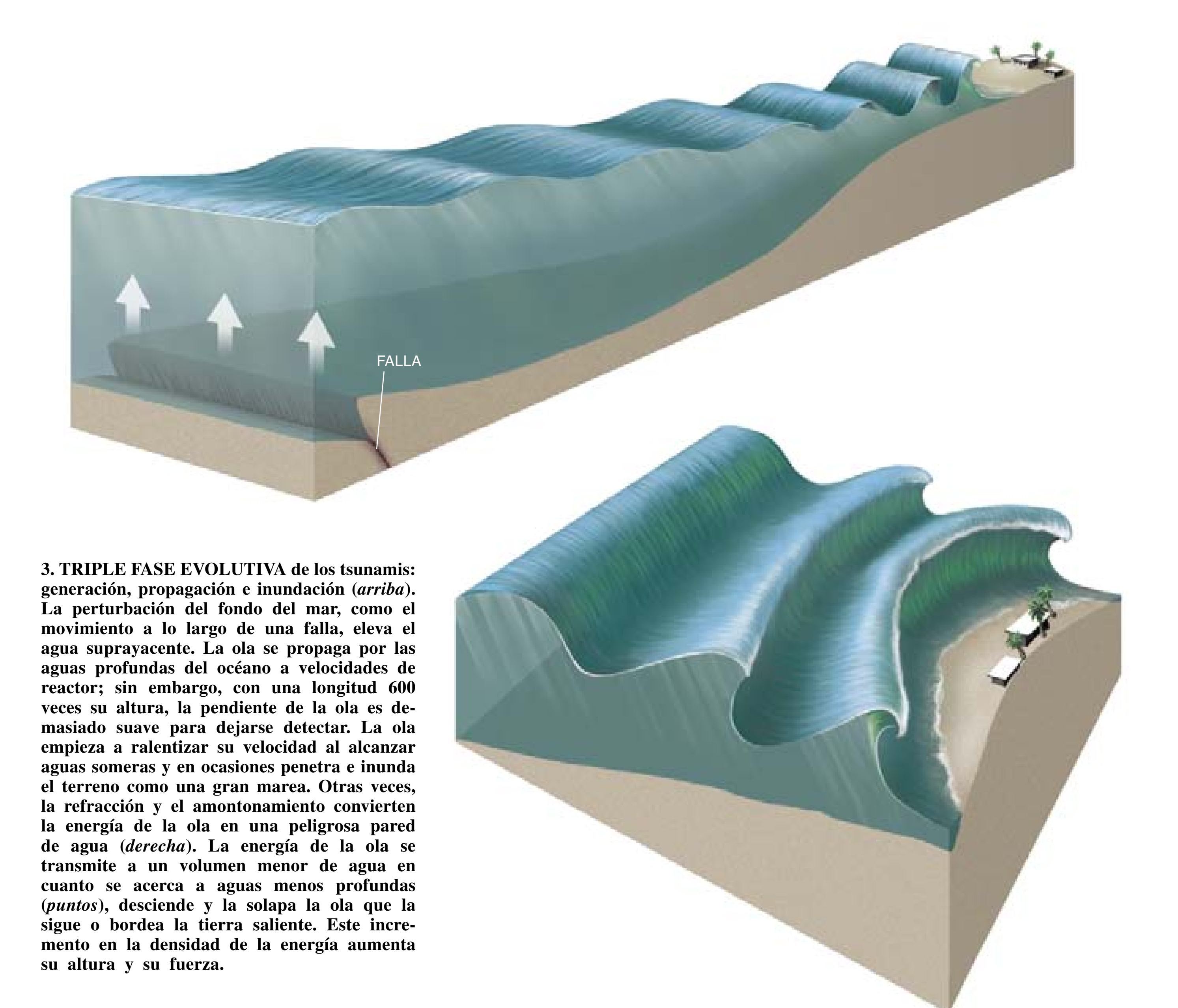
Debe enseñarse a los habitantes de las costas a huir hacia las montañas cuando sientan la sacudida del suelo producida por un terremoto. Por desgracia, algunas veces sólo se percibe un leve temblor. En ocasiones, ni siquiera eso, como sucedió en el tsunami de Nicaragua de 1992, en el que 170 personas perdieron la vida y unas 13.000 se quedaron sin hogar. Se estima que entre un cinco y un diez por ciento de los terremotos que generan tsunamis lo hacen con ese sigilo. Por eso se les llama terremotos silenciosos, descritos por Hiro Kanamori, del Instituto de Tecnología de California.

En el caso del último ocurrido en Nicaragua, las ondas cortas del terremoto no produjeron el retumbo característico que estalla y se propaga desde el epicentro. Las ondas largas alcanzaron la costa y la golpearon con furia, sin que los sismógrafos, que registran sólo ondas con períodos menores a 20 segundos, las detectaran. Según Kanamori, el terremoto de Nicaragua fue de una magnitud cinco veces superior a la considerada (7,0) porque no se tuvo constancia de esas ondas de baja frecuencia. La catástrofe de Nicaragua puso en evidencia la necesidad de enlazar sismógrafos de banda ancha, sensibles a ondas de muy baja frecuencia, a los sistemas de alerta y detección de tsunamis para poder evaluar su verdadero peligro potencial. *—F.G.*

aunque las medidas del desplazamiento del fondo no pueden ser, de momento, conocidas. Se aplica un modelo ideal del seísmo que implica que las placas tectónicas se deslizan bajo otras siguiendo un simple plano rectangular. Pese a tal simplificación, la predicción de la altura inicial que alcanzará el tsunami requiere de la descripción de al menos diez parámetros, entre ellos la magnitud del deslizamiento a ambos lados del plano imaginario, su anchura y su longitud. Sin embargo, producido un terremoto, de la interpretación de sus datos sísmicos sólo podremos obtener directamente la orientación del plano de falla supuesta, la localización, la magnitud y la profundidad del temblor. El resto de los parámetros deberán estimarse, para así emitir una rápida respuesta que sirva de guía a los equipos de emergencia. Nada tiene, pues, de extraño que la primera simulación nos dé frecuentemente una inundación subestimada en un factor de cinco a diez.

La baja estimación del territorio inundado puede indicar que infravaloramos la altura del tsunami por la sencilla razón de que el modelo de un plano de falla simple distribuía la energía del seísmo sobre una extensión demasiado grande. El análisis de los datos sísmicos no puede prever la distribución de la energía más allá de la de las propias ondas sísmicas, que se extienden a lo largo de centenares de kilómetros. Sólo mucho después de que el tsunami alcance las costas, los simuladores pueden trabajar a partir de los registros anteriores y posteriores al terremoto para calcular de nuevo su altura inicial. Por ejemplo, tras meses de réplicas, se comprueba que la energía sísmica se concentra en regiones mucho menores que las calculadas en el modelo del plano de falla simple. Cuando se concentra la energía sísmica en un área menor, el movimiento vertical del fondo del mar es mayor y, por ende, la altura inicial del tsunami. Sólo después de meses de tenaz investigación se consiguen simulaciones aceptables. Cada simulación que nos va acercando a la realidad del desastre aumenta la solidez de las predicciones.

La propagación del tsunami transporta la energía sísmica desde la zona del terremoto a través de las ondulaciones del agua, a la manera en que la energía del temblor se dispersa por la litosfera. En esta fase, la altura de la ola es tan pequeña respecto a su longitud de onda y la profundidad del agua, que no influye



3. TRIPLE FASE EVOLUTIVA de los tsunamis: generación, propagación e inundación (*arriba*). La perturbación del fondo del mar, como el movimiento a lo largo de una falla, eleva el agua suprayacente. La ola se propaga por las aguas profundas del océano a velocidades de reactor; sin embargo, con una longitud 600 veces su altura, la pendiente de la ola es demasiado suave para dejarse detectar. La ola empieza a ralentizar su velocidad al alcanzar aguas someras y en ocasiones penetra e inunda el terreno como una gran marea. Otras veces, la refracción y el amontonamiento convierten la energía de la ola en una peligrosa pared de agua (*derecha*). La energía de la ola se transmite a un volumen menor de agua en cuanto se acerca a aguas menos profundas (*puntos*), desciende y la solapa la ola que la sigue o bordea la tierra saliente. Este incremento en la densidad de la energía aumenta su altura y su fuerza.

en el comportamiento de la onda. Según la teoría de la ola lineal, el tsunami procederá con tanta mayor rapidez cuanto mayores sean la profundidad del agua y la longitud de onda. La dependencia de la velocidad del tsunami respecto a la profundidad del agua supone que la refracción de las irregularidades del fondo del mar puede modificar la dirección de la ola, en especial si alcanza aguas más someras. Los frentes de las olas tienden a alinearse paralelamente a la línea de costa; así, las olas rodean los cabos antes de estrellar contra ellos toda su energía acumulada. Al mismo tiempo, cada ola se ralentiza conforme llega a aguas más someras; de ese modo se van superponiendo unas a otras y acortando la distancia entre ellas en un proceso de amontonamiento. En consecuencia, la refracción y el amontonamiento transmiten la misma energía en un volumen cada vez menor de agua, provocando olas más altas y corrientes más rápidas.

La última fase de la evolución de un tsunami, ya sean grandes olas encrespadas o la inundación (horizontal), es la más difícil de modelizar. Puede arribar a la orilla transformado en una cresta gigantesca, en una pared de agua o en una inundación similar a la subida de la marea. La ola encrespada alcanza una altura tal, que la teoría de la ola lineal no sirve para describir la complicada interacción entre el agua y la línea de costa. Si bien se elevan hasta decenas de metros de altura, con dos o tres metros de altura basta para provocar auténticos desastres. En cambio, la inundación (horizontal), si los acantilados o la topografía escarpada no la impiden, penetra hasta centenares de metros tierra adentro. En ambos casos, el movimiento de las placas tectónicas que provocan los terremotos con epicentro en zonas de subducción, potencia sus efectos levantando el fondo del océano y hundiendo la costa. Este desplazamiento propaga las olas mar adentro en forma de prominentes crestas y hacia tierra en forma de grandes senos, razón por la cual el retroceso del mar acostumbre preceder al tsunami.

La subsidencia próxima a la costa no es el único factor que favorece la penetración del tsunami en tierra. Según recientes estudios acometidos por Raissa Mazova y Costas Syncolakis, las olas encrespadas y las inundaciones serán mayores si vienen precedidas por un retroceso del mar.

La educación salva vidas

Okushiri, Japón

12 de julio de 1993
Altura máxima de la ola: 31 metros
Víctimas mortales: 239

Los fuegos ardían a lo largo de las orillas arrasadas de Aonae, un pueblecito de pescadores de la península meridional de la isla de Okushiri, tras el paso del tsunami de 1993. Olas de entre cinco y diez metros lo golpearon cinco minutos después de una sacudida de 7,8 de magnitud con epicentro a unos 15 o 30 kilómetros océano adentro, en el mar del Japón. Las olas destrozaron los diques construidos tras el último tsunami. Volaron por los aires casas y vehículos, embarcaciones y balas del tinglado portuario, que lo arrasaron todo a su paso. Las colisiones provocaron fuegos por explosiones de propano y equipos eléctricos y los escombros hicieron el resto, impidiendo la llegada de los bomberos.

La pérdida de vidas humanas fue una tragedia, que hubiera sido peor de no disponer de buenos equipos de alerta y emergencia, así como de una población educada para la ocasión. La Agencia Meteorológica del Japón dio inmediatamente la alerta y muchos se salvaron al alcanzar terrenos elevados, huyendo al primer temblor, incluso antes de recibir la señal de alarma. Okushiri demostró a las claras que se puede mitigar el impacto de los tsunamis. Por otra parte, es el episodio mejor documentado de la historia. La valoración minuciosa de los daños en transportes y comunicaciones, las entrevistas con los supervivientes y protección civil local, las medidas de ascensión e inundación, junto con la fotografía aérea han aportado una interesantísima base de datos. —*F.G.*



La península devastada y los fuegos declarados tras el tsunami.



Un camión de bomberos destrozado entre los escombros.

El prever dónde podría romper un tsunami ayudaría a salvar vidas y haciendas, siempre que la población se percatara del riesgo y se comportara en consecuencia. Más de una cuarta parte de los tsunamis registrados en el Pacífico desde 1895 se originaron cerca de Japón. No ha lugar a la extrañeza. Japón se encuentra situado en una zona de alto riesgo, en la vecindad de los bordes de cuatro placas tectónicas. Conscientes de esa amenaza recurrente, los japoneses han realizado durante años importantes inversiones para mitigar los efectos de los tsunamis, sin olvidar programas públicos de educación integral, sistemas de alarma eficaces, barreras forestales litorales, diques y otros muros costeros.

La noche del 12 de julio de 1993 tales medidas hubieron de someterse a una prueba durísima. Un terremoto de 7,8 grados de magnitud en el mar del Japón generó un tsunami que afectó a varias partes de la isla de Okushiri. Cinco minutos después de la mayor sacudida, la Agencia Meteorológica Nipona alertó por radio y televisión que un tsunami se dirigía hacia la isla. Para entonces, olas de entre 10 y 20 metros de altura ya habían golpeado la costa más cercana al epicentro y cobrándose víctimas atrapadas. En Aonae, un pueblecito de pescadores del sur de la isla, la mayoría de sus 1600 habitantes huyeron a zonas más altas en cuanto sintieron el primer temblor. Sólo unos minutos después, olas de entre cinco y diez metros de altura arrasaron centenares de casas y negocios y los arrojaron al mar. Se perdieron más de 200 vidas, pero la rápida respuesta salvó muchas más.

Un quince por ciento de los 150 tsunamis registrados en el Japón de los últimos cien años se caracterizaron por una extrema severidad. Los registros son más pormenorizados que los de países con pocos o ningún programa de educación. Así, más de la mitad de los 34 tsunamis sufridos en Indonesia, a lo largo de idéntico período, fueron también muy dañinos para bienes y personas. Las entrevistas realizadas, tras el tsunami de 1992 de la isla de Flores con más de un millar de víctimas, indicaron que la mayoría de los lugareños no asociaron el terremoto a un posible tsunami. Por tanto, no abandonaron la isla. En parejas circunstancias de ignorancia vivían los habitantes de Papúa Nueva Guinea; sufrieron un gran número de bajas, mucho mayor del que cabría esperar de un tsunami del tamaño del ocurrido el año pasado.

Pese a que el seísmo de 1907 hundió la zona que ocupa ahora la laguna de Sissano, diríase que los tsunamis le resultan demasiado lejanos en el tiempo, o demasiado pequeños. Cuando se produjo el terremoto del año pasado, hubo quien se acercó a la costa para observar la perturbación, jugándose su destino.

Los expertos han extraído provechosas lecciones de los últimos tsunamis. También los episodios históricos aportan sus enseñanzas. El grupo de Lander ha descrito más de 200 tsunamis que afectaron a los Estados Unidos desde los primeros registros, en Alaska y el Caribe a comienzos del siglo XVIII y los de Hawai y la costa oeste en las postrimerías de la misma centuria. Las pérdidas ocasionadas se cifran en 500 millones de dólares y 470 víctimas, concentradas sobre todo en Alaska y Hawai. La zona de subducción de las Aleutianas y Alaska representa una amenaza inmediata para esos estados, así como para la costa occidental de la Unión. En la historia de esa región, castigada por terremotos generadores de tsunamis, destacan dos catástrofes, que promovieron la creación de sendos centros de detección y alerta de tsunamis del país. Hay una probabilidad del 84 por ciento de que la zona sufra un terremoto de 7,4 grados de magnitud, o más, antes del año 2008.

Otra grave amenaza se cierne sobre las costas de Washington, Oregón y el norte de California. Me refiero a la zona de subducción de Cascadia. Brian F. Atwater ha identificado depósitos de gravas y arenas, trasladados, se presume, desde las costas de Washington hasta el interior por tsunamis generados por los temblores de la zona de Cascadia. Los recientes sucesos avalan la hipótesis. El tsunami de Nicaragua arrojó una enorme cantidad de arena tierra adentro, de lo que dan testimonio también los depósitos e inundaciones documentados en Flores, Okushiri, Papúa Nueva Guinea y otros lugares.

Al menos, un segmento de la subducción de Cascadia se acerca al final del ciclo sísmico que culmina en un terremoto y un tsunami catastrófico. El peligro de un temblor es comparable al del sur de California: una probabilidad del 35 por ciento de sufrir un terremoto antes del año 2045. El terremoto y el consiguiente tsunami desencadenados en Cabo Mendocino en 1992 recordaron que en la zona de subducción de Cascadia se pueden generar tsunamis que alcancen la costa en cuestión de minutos.

FRANK I. GONZALEZ dirige el centro de cartografía de zonas afectables por tsunamis adscrito al Laboratorio del Medio Marino del Pacífico que el NOAA tiene en Seattle. Dedica este artículo a la memoria de su esposa, profesora desaparecida muy joven.

Inmediatamente después del inesperado tsunami de Cabo Mendocino, el Gabinete Federal de Respuesta ante Emergencias (FEMA) y el NOAA abordaron el estudio de los efectos de los terremotos en el norte de California y comenzaron la elaboración de mapas de inundación por tsunamis para las ciudades de Eureka y Crescent City. El mapa de riesgos resultante, considerando "todos los peligros", fue el primero de estas características realizado en Estados Unidos. Define las posibles zonas inundables por los tsunamis, la intensidad de los temblores, coladas de barro y desprendimientos de vertientes. Se pensó entonces en investigar los posibles efectos de un fuerte terremoto en la subducción de Cascadia y del consiguiente tsunami. Viven en las regiones costeras unas 300.000 personas; otros tantos turistas las visitan a lo largo del año. Tras una sacudida violenta, los tsunamis generados cerca de la costa (origen local) caerían sobre ella en cuestión de minutos, sin tiempo de alertar a la población. Además, una estimación conservadora del desastre, calculada a partir de la catástrofe de Okushiri, le costaría a la región entre 1250 y 6250 millones de dólares.

Las señales del riesgo de formación de tsunamis en la subducción de Cascadia, sumadas a los desastres padecidos en los últimos diez años, han respaldado los empeños puestos en la detección precoz de tsunamis. En 1997 el Congreso aprobó una partida de 2,3 millones de dólares para un programa nacional sobre métodos preventivos y paliativos de los efectos de tsunamis. Los estados de Alaska, California, Hawai, Oregón y Washington se asociaron con el NOAA, el FEMA y el USGS para dar respuesta a la amenaza de tsunami, sea de origen local o remoto. Se busca acotar las zonas amenazadas, mejorar la detección precoz de los tsunamis y educar a la población para asegurar una correcta respuesta a las sacudidas.



4. LA EDUCACION de la población es crucial en el impulso que se da en Estados Unidos para evitar futuras catástrofes debidas a los tsunamis. Señales, iguales para todos los estados del Pacífico, avisan ahora a los habitantes y visitantes de las costas con riesgo de tsunami.

Para sustanciar la amenaza contra regiones costeras concretas se puede recurrir a la elaboración de mapas de superficie inundable, como los realizados para las ciudades de Eureka y Crescent City, acompañada de avanzadas simulaciones por ordenador. Esta clase de mapas aporta una base para el diseño de planes de emergencia locales y dibuja las vías de evacuación adecuadas. Hasta el momento, sólo el estado de Hawai ha emprendido el desarrollo sistemático de estos mapas. Por otro lado, en tres poblaciones de Oregón ya se han recibido mapas, seis más se esperan para otras poblaciones del mismo Oregón, Washington y California. Tres más se hallan en proyecto para Alaska.

El servicio de protección civil necesita la confirmación fiable y rápida del peligro de tsunami. Con ese fin los sensores de mareas se han adaptado a la detección de tsunamis; con la ampliación de la red de sismógrafos, se prevé que se obtendrá información más completa y veloz de la naturaleza de los temblores. Ahora bien, reconocido el interés de los sismógrafos para los sistemas de emergencia, no es menos cierto que miden terremotos pero no tsunamis,

Ni el primero ni el último

Islas Aleutianas orientales

1 de abril de 1946

Altura máxima de la ola: 35 metros

Víctimas mortales: 165

A lo largo de los últimos diez años, se han formado numerosos tsunamis en la fosa del Pacífico. Sus catastróficas consecuencias no son, por otro lado, ninguna novedad. Los terremotos desencadenados a lo largo de la zona de subducción de las Islas Aleutianas de Alaska son los más destructivos que se han registrado en la historia de los Estados Unidos. El 1 de abril de 1946, un terremoto de 7,8 grados de magnitud ocasionó un tsunami que arrasó el faro del cabo Escocia en Alaska y mató a cinco guardacostas. El mismo tsunami sorprendió, cinco horas después, a los habitantes de Hilo, en Hawai. Allí las olas arrojaron por los aires a algunos escolares, poco antes de que empezaran las clases y se llevó un hospital. El balance final fueron 165 víctimas mortales, 159 en Hawai, y daños superiores a los 26 millones de dólares.

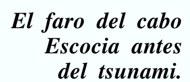
Los Estados Unidos reaccionaron creando el Centro de Detección y Aviso de Tsunamis del Pacífico en Hawai, en 1948. En la misma línea, tras otro tsunami que acabó con la vida de un largo centenar de personas en Alaska, se inauguró el Sistema Regional de Detección y Aviso de Tsunamis de Alaska (ahora Centro de Detección y Aviso de Tsunamis de la Costa Oeste y Alaska). El reciente descubrimiento de la amenaza de la zona sísmica de la costa occidental ha aconsejado tomar medidas para afrontar el desastre *antes* de que éste ocurra. La intención tanto de los estados como de la administración federal es realizar un programa sistemático de mapas de riesgo de inundaciones, aplicar técnicas avanzadas, instalar una red submarina de detección de tsunamis y realizar campañas de educación para preparar a la población ante la eventualidad de una catástrofe. —*F.G.*



Parquímetros doblegados en Hilo, Hawai.



El faro del cabo Escocia después del Tsunami.



El faro del cabo Escocia antes del tsunami.



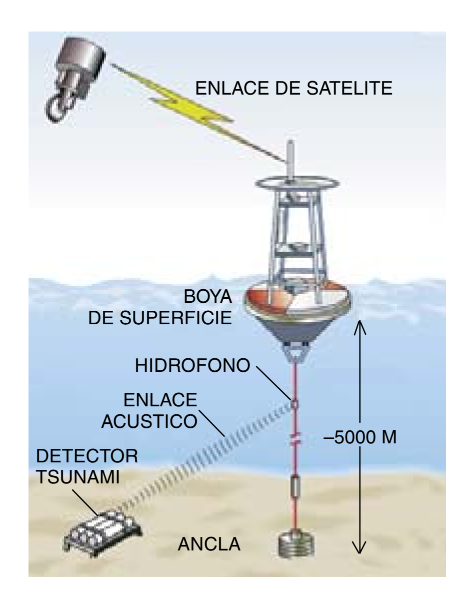


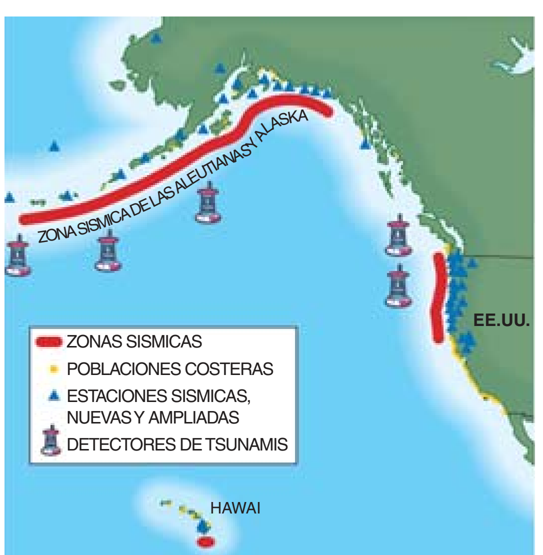
y que la variación de las mareas detecta tsunamis generados cerca de la costa, no su energía propagándose desde miles de kilómetros. De todo ello resulta una inaceptable tasa de un setenta y cinco por ciento de falsas alarmas desde los años cincuenta. Además del costo que ello supone, los sistemas de emergencia pierden credibilidad y las evacuaciones ponen en peligro a las poblaciones afectadas. El 7 de mayo de 1986 se produjo una falsa alarma que obligó a la evacuación de Honolulú; las pérdidas sufridas por culpa del error superaron los 30 millones de dólares.

El NOAA desarrolla en la actualidad una red de seis estaciones de registro en profundidades oceánicas. Se ha marcado el objetivo primordial de detectar y alertar sobre la aparición de tsunamis en tiempo real. Hablamos del proyecto DART ("Deep-Ocean Assesment and Reporting of Tsunamis", Detección y Aviso de Tsunamis a Gran Profundidad). Ha concluido ya el período de pruebas de los prototipos. Se espera que la red entre en funcionamiento en un par de años. La razón subyacente bajo este sistema de alarma es bastante sencilla. Si se desata un terremoto con epicentro en la costa de Alaska mientras disfrutamos nuestras vacaciones en las playas de Hawai, lo único que necesitaremos es el DART. ¿Por qué?

Los sismómetros repartidos a lo largo de la fosa Pacífica pueden registrar casi de inmediato la localización de un gran temblor en Alaska. Luego, mediante complejos programas informáticos se infiere cuánto tiempo tardará el tsunami resultante, aunque su existencia no sea evidente, en alcanzar las costas de Hawai. Tras algunos minutos, los sensores de mareas instalados en la costa detectan el tsunami. De todos modos, la única forma de tener absoluta seguridad de que se cree un tsunami sería detectarlo y registrarlo en su recorrido por el océano.

En teoría, nada más sencillo que una red de detección en tiempo real. Pero la complejidad técnica y logística que encierra, ha demorado hasta ahora su implantación. Los sistemas del DART dependen de los equipos de registro de la presión en el fondo oceánico desarrollados por Hugh B. Milburn, Alex Nakamura, Eddie N. Bernard y yo mismo en el Laboratorio del Medio Marino del Pacífico. Estos equipos detectan el aumento de presión causado por el incremento de







5. LOS DETECTORES DE TSUNAMIS en profundidad (*izquierda*) y la ampliación de la red actual de sismógrafos (*triángulos azules en el mapa*), previstos para instalar en un período de dos años, pretenden evitar los ataques por sorpresa de los tsunamis. Los detectores de profundidad dependen de refinados sensores instalados en el fondo del mar. Cuando uno de estos sensores capte una ola pasando sobre él, enviará señales acústicas a una boya de superficie. Esta transmitirá el aviso vía satélite a los responsables del sistema de emergencia.

volumen de agua suprayacente al paso de la cresta del tsunami. Aunque se encuentren a 6000 metros de profundidad, los sensores captan un tsunami de hasta un centímetro de alto. No lo confunden con las olas causadas por los barcos y las tormentas, pues éstas tienen una longitud de onda muy corta y, al igual que las corrientes marinas, transmiten de otro modo los cambios de presión al fondo del mar. Situamos los primeros instrumentos de registro en 1986, en el fondo submarino del Pacífico norte. Desde entonces los usamos para registrar tsunamis, aunque para acceder a la información hay que recuperar los equipos.

Se pretende que, cuando los sensores del fondo del mar detecten un tsunami, se transmitan acústicamente las mediciones a una boya situada en la superficie del océano, que las remitiría, vía satélite, a las estaciones terrestres. Se ha experimentado ya con boyas, satélite y sensores del fondo en numerosas estaciones oceanográficas, incluida la serie de 70 boyas meteorológicas instaladas a lo largo del Ecuador para registrar El Niño, el fenómeno oceanográfico con infames efectos en el clima mundial. La dificultad reside en lograr un sistema fiable de transmisión acústica de los datos. Después de tres años, se han desarrollado cuatro prototipos DART que han funcionado por breve tiempo antes de fracasar. Las modificaciones del diseño introducidas en un sistema de segunda generación han mejorado la comunicación entre los sensores del fondo y las boyas.

De aquí a dos años, nuestro laboratorio se propone instalar cinco estaciones al norte del Pacífico, entre las Aleutianas occidentales y Oregón, y seis en el Ecuador, para detectar los tsunamis generados en Sudamérica. Un mayor número de boyas reduciría la posibilidad de que algunos tsunamis pasaran inadvertidos, pero el presupuesto limita el número que el NOAA se puede permitir. De ahí el interés máximo de las simulaciones por ordenador. Junto con los datos de las boyas, las simulaciones proporcionarán predicciones más precisas que ayudarán a los responsables de protección civil a tomar la decisión de disparar o no la alarma.

Pese a todos los esfuerzos, ni el mejor sistema de emergencia funcionaría sin una colaboración adecuada de la población. La educación ocupa un puesto destacado en la triple misión del programa estadounidense de prevención y emergencia. Cada estado ha designado ya a los futuros coordinadores que proporcionarán información y asesoramiento a los responsables de protección civil durante la catástrofe. También es crucial para la seguridad de la población la coordinación entre los distintos estados, ya que los ciudadanos estadounidenses tienen una gran movilidad y los procedimientos de emergencia deben ser compatibles entre estados. En muchos puntos de la costa se ha colocado una señal estándar de riesgo de tsunami.

Los especialistas y los responsables de la protección civil coinciden en que los tsunamis son inevitables y que la técnica, por sí sola, no salvará vidas. Los habitantes del litoral tienen que estar preparados para reconocer las señales de un posible tsunami (un temblor fuerte y persistente) y correr hacia tierras altas. También necesitan mapas de superficies inundables y establecer rutas de evacuación. Sin olvidar ampliar la predicción a una región mucho más extensa del Pacífico. Todos estos esfuerzos convergen hacia un objetivo principal, a saber, evitar tragedias como las ocurridas en Papúa Nueva Guinea, Nicaragua y otros lugares del planeta.

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

UNITED STATES TSUNAMIS (INCLUDING UNITED STATES POSSESSIONS): 1690-1988. James F. Lander y Patricia A. Lockridge, NOAA/National Geophysical Data Center, Publicación 41-42, 1989.

THE CAPE MENDOCINO TSUNAMI. F. I. González y E. N. Bernard en *Earthquakes and Volcanoes*, vol. 23, n.º, páginas 135-138; 1992.

TSUNAMI! Walter Dudley y Min Lee. University of Hawaii Press, 1998.

Más información en la siguiente dirección de la World Wide Web http://www.pmel.noaa./tsunami.

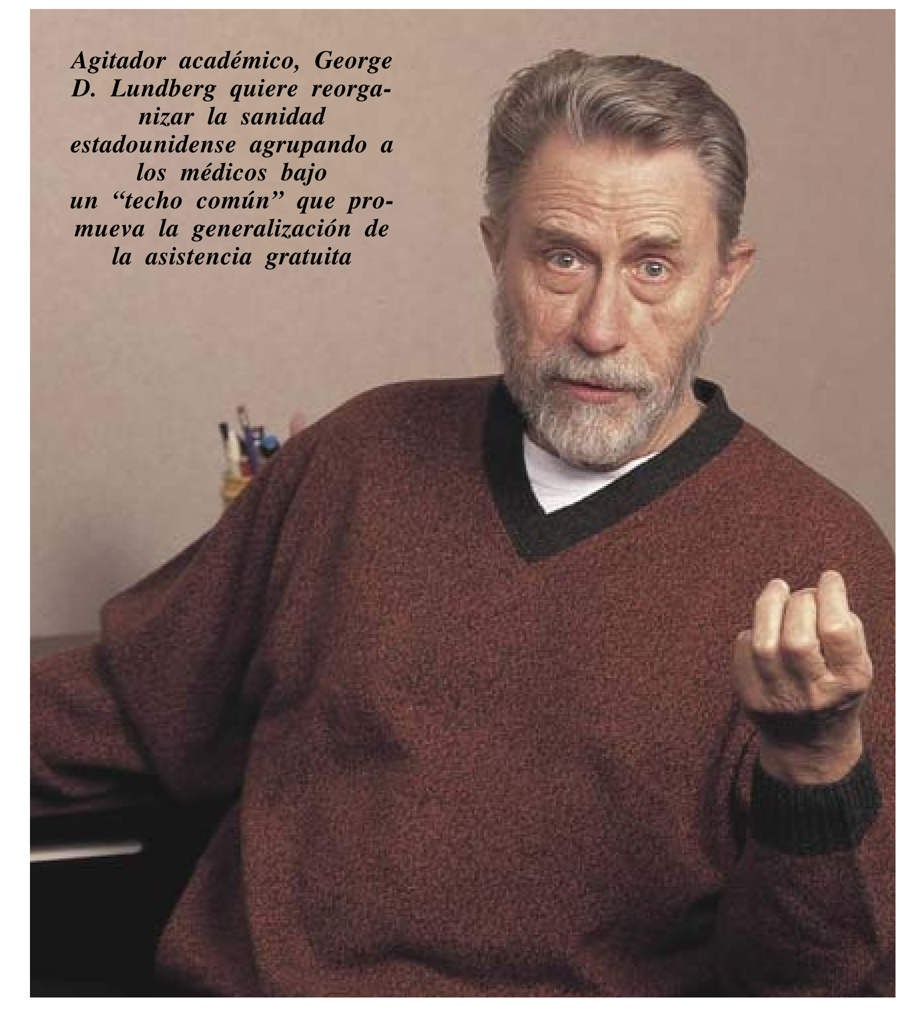
Tim Beardsley

GEORGE D. LUNDBERG: el ominoso abuso del poder contra la libertad de expresión

Cuando George D. Lundberg tomó posesión de la jefatura de la redacción del *JAMA* (*Journal of the American Medical Asociation*), se procuró una lista de los nombres de sus predecesores y del tiempo que permanecieron en el cargo. Uno por uno fue tachándolos conforme les iba superando. A principios de este año, sólo le quedaban dos; ambos habían durado 25 años.

La decisión de E. Ratcliffe Anderson Jr., consejero delegado de la AMA (*American Medical Asociation*), de despedir a Lundberg el pasado 15 de enero levantó protestas en todo el mundo. Al parecer, la medida se tomó porque Lundberg había acelerado la publicación de un artículo que pregonaba que el 59 por ciento de una muestra de estudiantes universitarios no consideraban que el contacto oral-genital constituyera una "relación sexual". Anderson dijo que apremiar la publicación equivalía a "situar el *JAMA*, indebida e injustificadamente, en el terreno de la disputa política": el juicio sobre la destitución del presidente Bill Clinton. Pero lo que pensara la gente nunca fue prueba de cargo contra el presidente. Anderson terminó por admitir que en el despido pesaron otras razones.

Ni la AMA ni Lundberg quieren detallarlas. En febrero ambas partes aceptaron un arbitraje, cuyos términos no han sido revelados, y emitieron un comunicado conjunto. En éste, el despido se trocaba en "ruptura", se elogiaba la "distinguida y valiosísima" labor editorial de Lundberg y se reiteraba el compromiso de la AMA de mantener la "integridad, independencia y autonomía" del *JAMA*.



Agitador académico, George D. Lundberg quiere reorganizar la sanidad estadounidense agrupando a los médicos bajo un "techo común" que promueva la generalización de la asistencia gratuita

Sin prestar especial credibilidad a tan hueca palabrería, muchos observadores ven en la expulsión de Lundberg una amenaza contra la libertad del *JAMA* para publicar información que pueda poner en berlina a la sociedad médica, que se gastó 17 millones de dólares en presiones políticas en 1997. Jerome P. Kassiret, redactor jefe del *New England Journal of Medicine*, calificó el lance de "ominoso precedente". De la misma redacción, Marcia Angell describe la medida de AMA para quitarse de encima a Lundberg como "un golpe bajo sin ton ni son". La redacción en pleno del *JAMA* expuso por escrito su total desacuerdo con la expulsión de Lundberg. Donald A.B. Lindberg, miembro del comité editorial, presentó su dimisión en protesta.

Todos reconocen la transformación obrada por Lundberg durante los 17 años al frente del *JAMA*, que pasó de mediocre órgano interno de la AMA a una de las revistas más reputadas del mundo, duplicando su circulación y estableciendo numerosas ediciones internacionales. Frank Davidoff, redactor de *Annals of Internal Medicine*, publicado por el colegio de médicos norteamericano, alaba la creatividad de Lundberg, siempre empeñado en obtener buenos trabajos.

Si alguna vez Lundberg se codeó con el aparato de la AMA, fue por equivocación. "No he rehuido la controversia en mi vida, y lo que soy se debe en gran parte a lo que hice de mí mismo", afirma con apostura y sin rencor. Escribió editoriales que se alejaban de la línea política de la institución patrocinadora. "Se nos criticó desde dentro y desde fuera de la AMA, constantemente, sobre multitud de cosas."

En mayo de 1994, por ejemplo, Lundberg ofreció una clasificación de las propuestas de reforma de la sanidad y le concedió a la del presidente Clinton el segundo puesto. Pero ninguna de las opciones había recibido por entonces la bendición de la AMA, más proclive a los republicanos que a los demócratas (aunque aplaude la "Carta de Derechos del Paciente" de Clinton). En la época en la que Lundberg dejó la revista, estaba planeando "acudir de nuevo con armas y bagaje en favor de los que no podían pagarse un seguro médico".

Además, estaba escribiendo un editorial en el que se pedía una "convención constituyente del milenio" para reorganizar el servicio sanitario norteamericano. El modelo vigente a lo largo del último siglo ha agotado su capacidad. La propia AMA sólo representa a unos dos quintos de los médicos estadounidenses, muy lejos de su año de apogeo, 1960, cuando agrupaba al 84 por ciento. Muchos médicos se agrupan en mutuas especializadas, según Robert J. Blendon, de la Universidad de Harvard, miembro del comité editorial, y la AMA ha perdido terreno entre los médicos universitarios. Lundberg proponía restablecer un "techo común" para todos los tipos de médicos estadounidenses, con un acceso gratuito y general a los servicios sanitarios básicos. Todavía confía en ver instituida esa seguridad social.

Para los próximos a Lundberg, la verdadera razón de su expulsión fue la resistencia a ceder en sus convicciones. Sostiene que el redactor de una revista médica debe representar los intereses del paciente, no los intereses financieros de su sociedad o de sus miembros. Mientras que propietarios, anunciantes y lectores pueden expresar sus opiniones directamente, los pacientes carecen de una tribuna efectiva, señala Lundberg. "Quienquiera que fuere el propietario de una fuente de información relevante, se trate de una revista médica o de una revista científica rigurosa, el editor debe disfrutar de una libertad absoluta para publicar lo que le parezca, si no queremos dejar en entredicho la integridad de la información de esa publicación. Si los criterios para determinar la publicación de un artículo acababan dependiendo de si se iban a ofender, y quizás ofender profundamente, a los anunciantes, los propietarios, los responsables de la política sanitaria, el gobierno, las compañías tabaqueras, la industria de las armas, siempre nos preguntábamos '¿Se va a beneficiar de esto el paciente?, ¿vale la pena correr el riesgo?'" Si la respuesta era afirmativa, "¡lo publicábamos!".

Su firmeza deriva en parte de su educación religiosa. Hijo único de una familia de inmigrantes suecos que vivían en Alabama, estudió la segunda enseñanza en una institución cristiana de Chicago antes de entrar en la Universidad de Alabama. Dos tías suyas trabajaban por entonces como misioneras médicas; murieron asesinadas en China por las huestes de Mao Zedong. Aquello le marcó y le inculcó el acicate por los asuntos médicos de interés general. Su labor editorial en la publicación médica tiene mucho que ver con la tarea misionera en que el mensaje es la información.

Estudió la carrera de medicina en Alabama con las mejores calificaciones. Se especializó en patología. A mitad de los años sesenta dirigía ya el servicio de patología del hospital clínico de El Paso (Texas). En 1967 le contrató la Universidad de California del Sur.

Con el encargo de ocuparse del enorme laboratorio del hospital universitario, puso en marcha una unidad toxicológica para drogadictos. Había entre 30 y 50 ingresos al día. Pero cuando Lundberg empezó una labor misionera, se llevó algunas críticas. Creó un programa de identificación de drogas que permitía que cualquiera llevara a analizar una muestra del narcótico; lo que se decía que contenía y el contenido real era publicado en el *Los Angeles Free Press* bajo el título de "Clasificación del Chute", de modo que los drogadictos pudieran evitar las tóxicas. La administración local canceló el programa, que hubo de reabrir ante las protestas de jueces, policía y médicos.

Lundberg fue reclutado para la jefatura del *JAMA* desde la Universidad de California en Davis, donde enseñaba patología desde 1977. Durante ocho años había sido miembro del comité editorial y se sentía atraído por el reto del cargo, aunque sabía que "tenía fama de que se exprimía a la gente que contrataban, para luego prescindir a la primera de cambio".

Pronto empezó a llamar la atención. Ha promovido la solidaridad de los médicos para prevenir la guerra nuclear, ha abogado por tratar la violencia como una cuestión de sanidad pública y ha reprobado a las compañías tabacaleras. Se ganó la impopularidad al reclamar más autopsias. El número de las realizadas no llega al 9 por ciento de la cifra de finados, pero los estudios dejan claro que los diagnósticos erróneos se han extendido de forma alarmante. Una investigación publicada en el *JAMA* el año pasado mostraba que las causas de muerte identificadas por los médicos diferían del diagnóstico de la autopsia, presumiblemente más acertado, en el 44 por ciento de los casos de cáncer, un hallazgo consistente con evaluaciones anteriores. Pero él cree que los médicos son reacios a solicitar autopsias porque los resultados ponen en tela de juicio su dictamen y posiblemente les exponen a responsabilidades penales.

También encrespó los ánimos este redactor sin pelos en la lengua cuando el pasado mes de noviembre publicó un número del *JAMA* dedicado a estudios clínicos de diversas terapias "alternativas". Insiste en que elevó los requerimientos científicos exigidos a los artículos de la monografía, en los que se concedía el probable valor de algunas terapias y se negaba el de otras. Algunos sectores de la AMA menos proclives a la medicina alternativa se pusieron manos a la obra para provocar su caída, sospecha.

Lundberg pretende continuar siendo un agitador académico profesional. Tiene ofrecimientos de la Escuela de Salud Pública de Harvard y de la Universidad del Noroeste, pero su domicilio es el ciberespacio. De la media docena de trabajos que le propusieron tras dejar la revista, aceptó uno, el de editor de Medscape, un puesto de Internet (www.medscape. com) que publica información médica destinada sobre todo a los facultativos, en parte revisada por expertos. Lundberg, que ha utilizado los ordenadores para la medicina desde 1963, explica que le gusta el alcance de la organización y comparte sus criterios. Pretende utilizar equipos móviles de médicos reporteros que redacten recensiones de los hallazgos clínicos en las mismas conferencias donde se presenten y que informen sobre ello en la Red.

En su momento, dice, ese puesto aspirará a publicar trabajos originales. Parece probable que Medscape se beneficie de la credibilidad que Lundberg puede proporcionarle, y presumiblemente él se sentirá libre para escrutar sin cortapisas los asuntos médicos. Insiste en que le han prometido una completa libertad de expresión.

Europa a media luz

Eclipse total de Sol del 11 de agosto de 1999

"El Sol y la Luna no se encontraron en armonía", refiere el documento chino Shu Ching a propósito del eclipse del año 2134 antes de J.C, uno de los más antiguos conocidos. Creíase en ese país que un dragón invisible devoraba el Sol. Por eso se desataba un fragor de tambores y arqueros que disparaban sus flechas hacia el firmamento, para así aterrorizar a la bestia y restablecer la luz del día. Lo que fue dragón en China, pasa a ser vampiro en Siberia y jaguar (o yaguará en guaraní) en Paraguay y Argentina. Hoy los eclipses, desnudos de ropaje mítico, constituyen fenómenos que los astrónomos esperan con impaciencia.

Luego de 38 años Europa volverá a experimentar la noche en pleno día.



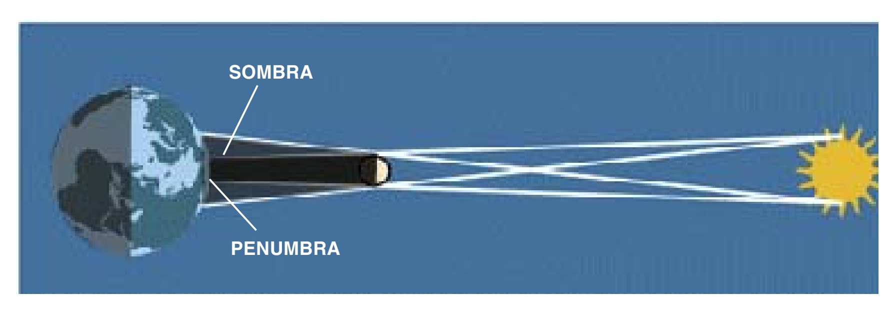
Efecto anillo de diamante. (Cortesía de F. Espenak)

En efecto, el último eclipse total de Sol en el continente europeo sucedió el 15 de febrero de 1961. El 11 de agosto próximo tendrá lugar el último eclipse total de Sol del siglo (y del presente milenio) y también el último visible en Europa de aquí a varios decenios, pudiendo alcanzar, según los lugares, más de dos minutos de totalidad.

Los eclipses no son meras curiosidades astronómicas. Baste pensar en un eclipse de Luna, cuando la Tierra se interpone entre el Sol y nuestro satélite y podemos, por tanto, distinguir la forma esférica del planeta a partir de su sombra proyectada sobre la Luna llena. A esa circunstancia solían apelar los primeros defensores de la redondez de la Tierra, como Pitágoras en el s. VI a.C.

De la misma manera, un eclipse de Sol permite estudiar la corona del astro. Esa extensa región, formada por plasma a temperaturas cercanas al millón de grados y que se extiende por varios millones de kilómetros en el espacio, fue descubierta por Baily durante el eclipse de 1842. La Luna, cuyo disco cubre la superficie solar, deja ver impresionantes arcos y serpentinas ondulantes de gas incandescente; gracias a ello nos es dado apreciar la notable similitud del diseño de la corona solar con la configuración que adoptan las limaduras de hierro en presencia de una barra magnética.

El eclipse de Sol ofrece una oportunidad singular para el estudio del espectro de los rayos solares. Durante el episodio del 18 de agosto de 1868, Janssen (quien luego crearía el Observatorio de Meudon en 1876) y Lockyer identificaron un nuevo elemento químico, el helio, desconocido hasta entonces.



El eclipse de Sol ofrece una oportunidad singular para el estudio del espectro de los rayos solares (C.N.D.P., París)

En los últimos minutos previos a la totalidad comienzan a notarse efectos extraños. La luz ambiente se desvanece rápidamente. A veces pueden distinguirse las bandas de sombra, que son franjas de luz y sombra, débiles, paralelas y ondulantes, que avanzan raudamente sobre superficies planas y claras, resultado de la distorsión de los rayos solares en las irregularidades de la atmósfera terrestre. Al propio tiempo, la temperatura desciende en algunos grados. Fauna y flora reaccionan ante la obscuridad creciente. Ciertas flores se cierran y los animales se comportan como cuando cae la noche; las aves, en particular, se posan en las ramas de los árboles.

Justo antes del recubrimiento total del Sol, el fino segmento de luz se divide en una serie circular de "perlas" resplandecientes, como en un collar, llamadas las cuentas de Baily. Este hermoso espectáculo, producido gracias a los últimos destellos de los rayos solares al atravesar los espacios entre las colinas del borde lunar, desaparece luego de unos segundos.

Todas las joyas brillantes se desvanecen; todas menos una. Este último rayo solar nos llega al mismo tiempo en el que el "aura" de la corona despliega toda su magnificencia. Juntos forman lo que los cazadores de eclipses dieron en llamar el efecto anillo de diamante. Un nuevo pestañeo de ojos y la totalidad comienza.

El 11 de agosto próximo el cono de sombra de la Luna encontrará el globo terrestre al este de Nueva Escocia, en Canadá. Luego cruzará el océano Atlántico Norte, para llegar al sudoeste de Inglaterra una hora más tarde. De allí seguirá por Francia, Alemania, Austria, Hungría, Rumania y Bulgaria, hasta el Mar Negro. Después continuará en dirección sudeste a través de Medio Oriente para culminar en el golfo de Bengala, durante el atardecer en la India oriental. En ese momento la sombra lunar abandonará la superficie de la Tierra y volverá al espacio. Durante su periplo de algo más de 3 horas y 7 minutos habrá recorrido unos 14.000 km.

a la disponibilidad de los nutrientes del suelo. La cantidad de elementos retranslocados puede incrementar, no obstante, con una mejor disponibilidad de tales nutrientes.

Los rebollares (*Quercus pyrenaica* Willd) se desarrollan en buena parte de la península sobre suelos ácidos. Nuestra área de estudio se encuentra en la Sierra de Gata, donde se han seleccionado parcelas de experimentación en bosques maduros de Fuenteguinaldo y Navasfrías. Reina allí un clima mediterráneo templado, con inviernos lluviosos y veranos cálidos. La temperatura media oscila alrededor de 13,3 ºC en Fuenteguinaldo y 11,3 ºC en Navasfrías. Las precipitaciones alcanzan los 720 mm en aquélla y los 1580 en esta última.

El bosque de Fuenteguinaldo se desarrolla sobre granito. La densidad media del arbolado es de 738 pies por hectárea. En Navasfrías el bosque se desarrolla sobre esquistos; la densidad media de su arbolado es de 820 pies por hectárea.

La mayor concentración de nitrógeno en los órganos foliares se registra en abril, durante el inicio de su desarrollo. En primavera el flujo de crecimiento está ligado a la intensa actividad mitótica y crea una alta demanda de nitrógeno. Después, su contenido disminuye a lo largo del período vegetativo y sobre todo en la fase de senescencia (otoño). Se establece una evidente retranslocación antes de la abscisión total. Las ramas muestran también importantes diferencias estacionales.

A lo largo de todo el período de experimentación se mantiene también una aportación alta de calcio para la formación y desarrollo de los órganos foliares. La concentración más elevada del ion se establece antes de la fase de abscisión foliar, en otoño. El calcio podría contribuir a la lignificación de los tejidos; se acumula en los tejidos viejos, en tanto que su concentración es muy baja en tejidos jóvenes. La posible retranslocación del calcio en hojas senescentes podría suplir parte de la demanda, sobre todo en los estadios más jóvenes.

La concentración foliar de magnesio no muestra una tendencia estacional clara. En las ramas de los robles el porcentaje se mantiene constante. La retranslocación puede aportar un 7,20 % de la demanda de ese nutriente. Existe una relación directa entre concentración orgánica de magnesio y substrato donde medra el pie.

Con el nitrógeno y el fósforo forma el potasio el grupo de los elementos más móviles de cualquier ecosistema. En los órganos foliares hay una mayor exigencia de K en primavera, tras la eclosión, motivado quizá por una intensa actividad de transpiración o de los estomas. Su concentración decae después del período de máxima actividad fotosintética. En las ramas ocurre un fenómeno similar, si bien parece intervenir algún proceso fisiológico que evitaría pérdidas excesivas de K.

La concentración foliar de fósforo tiende a disminuir a lo largo del período vegetativo. La mayor demanda se establece durante la primavera y decrece durante la senescencia. El porcentaje de Na fluctúa permanentemente a lo largo de todo el ciclo vegetativo, lo mismo en hojas que en ramas. El manganeso y el hierro muestran una acumulación continua en las hojas y, más tenue, en ramas.



Rebollar típico de la Sierra de Gata

IGNACIO SANTA REGINA
Instituto de Recursos Naturales
y Agrobiología, CSIC
Salamanca

Relojes circadianos

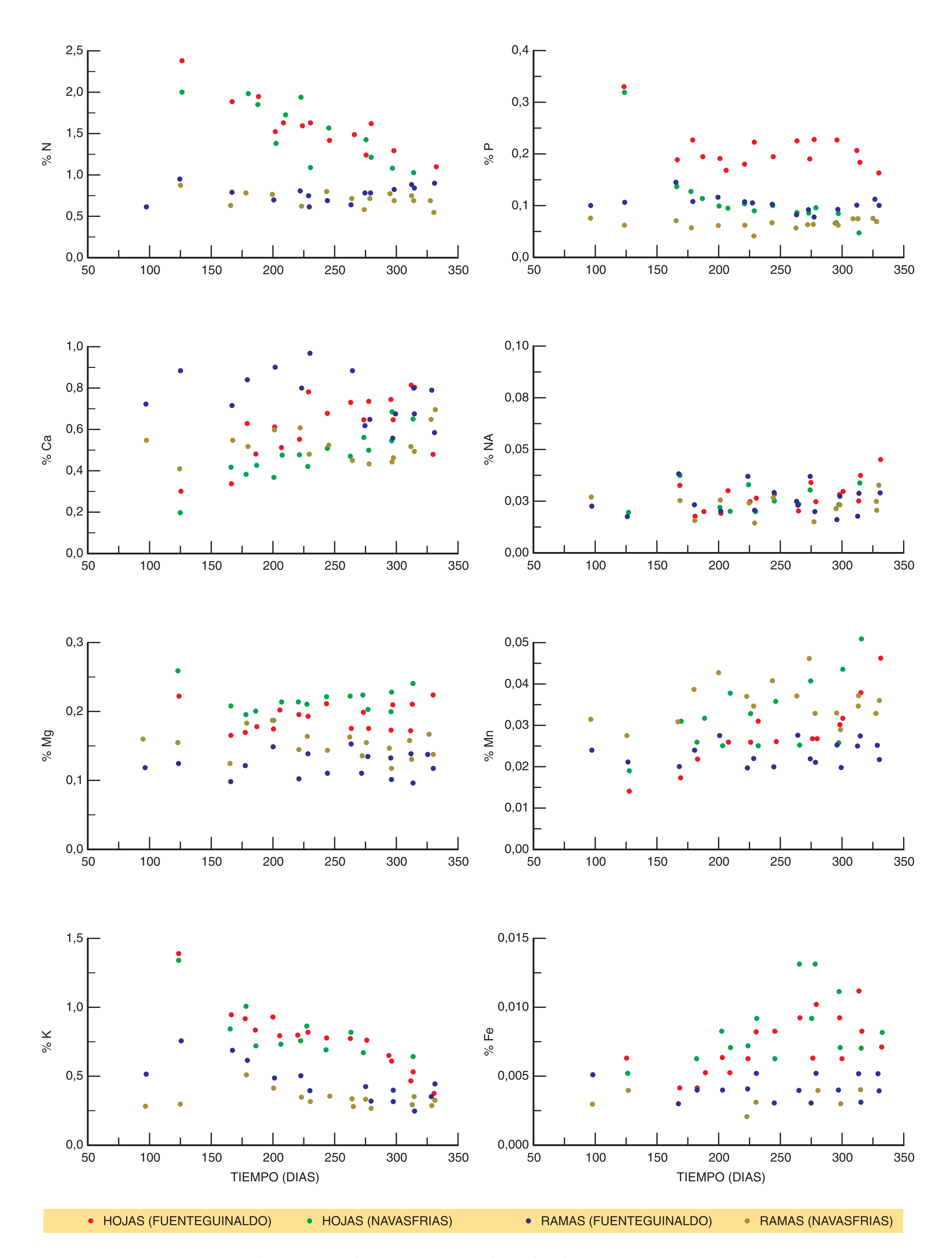
En las plantas

Los organismos suelen coordinar sus actividades con la sucesión cíclica del día y la noche para desempeñarlas en el momento más favorable. No se trata tanto de una mera respuesta a los ritmos diarios de luz y oscuridad, cuanto de una pauta dependiente de un mecanismo interno, de un reloj circadiano, capaz de medir el tiempo y de anticiparse a los cambios ambientales que ocurren cada día. (Llámase período al tiempo que tarda en transcurrir un ciclo completo.)

Los relojes circadianos mantienen los ritmos en ausencia de señales externas. Se admite en ellos una división tripartita. El mecanismo central del reloj es un *oscilador* o *marcapasos*, que genera los ritmos diarios. Las *rutas de entrada* transmiten la información que sincroniza el oscilador con los ciclos de día y noche. Las señales generadas por el marcapasos se transducen a través de las *rutas de salida*.

Los estudios realizados en la mosca del vinagre *Drosophila melanogaster* y en el hongo *Neurospora crassa* han permitido perfilar un modelo en que el oscilador consiste en un bucle de retroalimentación negativa que autoregula la transcripción y traducción de sus componentes. Los genes *period* (*per*) y *timeless* (*tim*) de *Drosophila*, junto con el gen *frequency* (*frq*) de *Neurospora*, constituyen elementos del marcapasos.

Las plantas ofrecen varias ventajas para el estudio de los ritmos circadianos. En ellas, muchos



Relación entre la concentración de cada elemento versus *tiempo*

En Francia, la sombra de la Luna, con una anchura de 110 kilómetros, recorrerá los 560 km que median entre el Havre y Estrasburgo en sólo 12 minutos, a una velocidad media de unos 2800 kilómetros por hora. Esta es aproximadamente unos 400 km/h superior a Mach 2, velocidad a la que el *Concorde* debió volar el 30 de junio de 1973 para permitir a los investigadores a bordo la observación de un eclipse total ¡durante 74 minutos!, récord jamás igualado hasta el momento. Este vuelo, a unos 17.000 metros de altitud, se proyectó con ocasión del eclipse solar excepcional de 7 minutos de totalidad máxima en Mauritania.

Con el oscurecimiento del cielo algunos planetas serán fácilmente identificables a simple vista; por ejemplo, Mercurio y Venus. Haciéndoles compañía, algunas estrellas brillantes cercanas al Sol eclipsado serán también visibles, como Regulus (el "reyezuelo", así apodado por Copérnico) en la constelación del León. Lo mismo sucede con un par de estrellas muy parecidas, Cástor y Pólux (jinete y púgil, respectivamente), los hijos gemelos nacidos de los amores de Zeus y Leda en la mitología. También podremos distinguir a Procyon, del griego "delante del Can", una de las dos estrellas que forman al Can Menor.

La presencia del menor anuncia la llegada del Can Mayor y de su majestuosa estrella Sirio, la más brillante de nuestro cielo y cuya adoración en Egipto se remonta al 3200 antes de J.C., cuando su ascenso en el horizonte marcaba el inicio del Año Nuevo y de las esperadas inundaciones del Nilo.

La sombra de la Luna pasará a sólo 30 km al norte de París, a la altura de Chantilly. En consecuencia, el eclipse parisiense será sólo parcial, aunque con un oscurecimiento del 99,3 %. Durará 2 horas con 41 minutos, desde las 11:04 hasta las 13:45, alcanzando su máximo a las 12:23, hora de verano. La "ciudad luz", que no ha visto un eclipse total desde el 22 de mayo de 1724, permanecerá en la penumbra con una luminosidad de sólo mil veces la de la Luna llena.

Por su parte, España no corre mejor suerte. En Barcelona y Madrid, por ejemplo, el oscurecimiento no excederá los 72 % y 66,5 %, respectivamente. En Madrid el eclipse parcial comenzará a las 10:52 y culminará pasadas las 13:33, con un máximo a las 12:10.

Para concluir, recuérdese que hay que tomar ciertas precauciones para observar un eclipse de Sol en seguridad. En especial, nunca hay que mirar al Sol, aun eclipsado, sin un buen filtro de protección.

ALEJANDRO GANGUI
Fundación Treilles
y Observatorio de Meudon, París

Variación estacional de nutrientes

Rebollares salmantinos

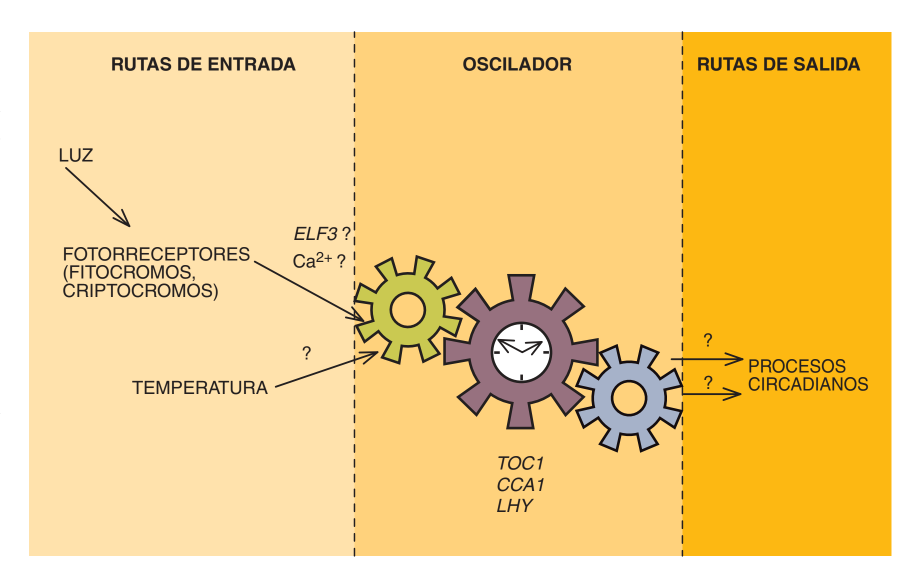
El ciclo de nutrientes en un ecosistema es un proceso complejo. Comprende múltiples compartimentos y flujos cuyo número e importancia varía de un elemento o ion a otro. Al analizar la composición de los restos vegetales procedentes del desfronde se detectan tendencias estacionales, que reflejan procesos internos del árbol asociados a la edad de los órganos.

El tiempo que los nutrientes permanecen en la biomasa de las especies vegetales está regulado por las propias plantas. La parte interna del ciclo de nutrientes queda controlada por adaptaciones del vegetal. En principio, las plantas que absorben nutrientes del suelo con un coste energético elevado, deberían tender a minimizar ese esfuerzo mediante el proceso de retranslocación, sobre todo si se encuentran en sitios de escasa reserva. La retranslocación en sistemas de arbolado consiste en el paso de nutrientes desde las hojas senescentes hacia las partes perennes del árbol.

La composición de la hojarasca determinará la velocidad de mineralización del suelo. Si la razón de carbono/nutrientes es elevada, se produce una fuerte inmovilización de los nutrientes en la materia orgánica del suelo, con el consiguiente empobrecimiento adicional del substrato edáfico. Estas relaciones concatenadas conducen a un sistema de retroalimentación positiva, donde la concentración de nutrientes en la hojarasca es la variable que controla el mecanismo.

La recuperación de nutrientes, por vía de reabsorción, de hojas senescentes y su acumulación en las partes perennes del árbol es un fenómeno común. La reabsorción o retranslocación puede suplir una demanda significativa de los requerimientos nutricionales para la producción de nueva biomasa. Merced a ese proceso, el árbol se independiza de las fluctuaciones de nutrientes en el suelo y disminuyen las pérdidas por descomposición de biomasa.

Creíase que la retranslocación podría favorecer el crecimiento del árbol en suelos estériles. Pero se ha demostrado que la eficiencia de retranslocación no se halla vinculada



Representación esquemática de un reloj circadiano, constituido por las rutas de entrada, el oscilador central y las rutas de salida. En cada parte, se indican los genes que codifican posibles componentes de los relojes vegetales

procesos suceden en ciclos de unas 24 horas; por ejemplo, el movimiento de las hojas y los pétalos, la apertura y cierre de los estomas, la asimilación fotosintética de CO_2, los niveles de algunas enzimas metabólicas, el transporte de iones, los niveles celulares de calcio y la producción de algunas hormonas.

Por otro lado, la producción de plantas transgénicas luminiscentes ha aportado un fuerte impulso a la investigación en torno a los relojes circadianos vegetales. En estas plantas, la expresión del gen de la luciferasa (*luc*) de la luciérnaga viene inducida por el promotor de un gen regulado por el oscilador, el gen que determina la proteína que une clorofila *a*/*b* (CAB). Por tanto, la luminiscencia de estas plantas transgénicas *cab:luc* refleja los ritmos circadianos.

¿Qué sabemos de las rutas de entrada? Dos tipos de señales modulan el reloj para coordinarlo con las variaciones externas, la luz y la temperatura. Se nos escapa el mecanismo de regulación por los cambios térmicos. En cambio, la percepción de la luz por las plantas ha sido objeto de estudio intenso. La luz se percibe a través de los fotorreceptores; entre éstos, los fitocromos (receptores de luz roja y luz roja lejana) y los criptocromos (receptores de luz azul) ejercen algún efecto sobre el oscilador.

La transducción de las señales luminosas hasta el marcapasos sigue envuelta en el misterio. Tal vez, intervengan en ese proceso el calcio y el gen *ELF3*. Las mutaciones inducidas en el gen *ELF3* provocan arritmia en ciertos procesos, alargamiento del hipocótilo (fenotipo característico de mutantes afectados en fotopercepción o fototransducción) y floración temprana. En muchas plantas, el tiempo de floración está regulado por el número de horas diarias de luz; se ha sugerido que esta modulación podría producirse a través de un reloj circadiano. En los mutantes *elf3* la floración se muestra insensible al fotoperíodo.

La mutagénesis de plantas transgénicas *cab:luc* ha permitido aislar varios mutantes de *Arabidopsis thaliana* que podrían estar afectados en el marcapasos. El mejor caracterizado de ellos, *toc1-1*, tiene acortado el período de varios ritmos, pero no parece sufrir alteración alguna en las rutas de entrada. Cabe que el gen *TOC1* sea parte del oscilador.

Muy recientemente se han clonado dos genes de *Arabidopsis*, *CCA1* y *LHY*, cuya actividad parece esencial para el funcionamiento del reloj. Ambos genes cifran proteínas que tienen homología con factores de transcripción; sus ARN mensajeros siguen patrones rítmicos de expresión. La proteína CCA1 también oscila a lo largo del día. La sobreexpresión de tales genes provoca arritmia en todos los procesos circadianos que se han analizado, incluida su propia expresión, además de alargamiento del hipocótilo y floración tardía. La sobreexpresión de *LHY* hace además que la floración sea insensible al fotoperíodo. De ello se infiere que *CCA1* y *LHY* participan, posiblemente, en un bucle de retroalimentación negativa que podría constituir un oscilador, como ocurre con los genes *per* y *tim* de *Drosophila*.

En cuanto a las rutas de salida, apenas se conocen los mecanismos que llevan al control cíclico de los procesos circadianos. La transcripción rítmica de genes, como por ejemplo *CAB*, indica que el control de la transcripción es uno de esos mecanismos. Las variaciones diarias en los niveles intracelulares de calcio podrían ser otro. Dado que varios genes regulados por el reloj se expresan en fases distintas, debe de haber más de una ruta de salida del oscilador.

Quedan muchas cuestiones pendientes. Los ritmos circadianos pueden existir en células aisladas, pero se desconoce si existe uno o varios osciladores. El hecho de que ciertas alteraciones sufridas por un gen (*TOC1*, *LHY* o *CCA1*) puedan cambiar el ritmo de muchos procesos aboga por la existencia de un oscilador común o de varios osciladores que compartan algún componente. Datos recientes indican la posible existencia de un reloj independiente en los cloroplastos.

Se dan manifiestos parecidos entre el funcionamiento y la organización de los relojes de *Neurospora* y *Drosophila*, pero no hay homología de secuencia entre los genes *frq* y *per* o *tim*. Tampoco se han identificado hasta ahora genes vegetales homólogos a ellos. Habrá que investigar más en los genes *ELF3*, *TOC1*, *LHY* y *CCA1* y en las interacciones entre ellos para conocer mejor los relojes vegetales. Los conocimientos adquiridos a partir de otros organismos pueden servir de orientación para el futuro.

PAULA SUÁREZ LÓPEZ
Centro John Innes,
Norwich,
Inglaterra

Bancos de semillas

Incidencia del fuego

El fuego es, a un tiempo, fuente de perturbación y factor modelador del paisaje. La composición florística de las comunidades que emergen tras un incendio dependerá de la naturaleza de la cobertura ori-



Muestras de suelo en invernadero para estudio de banco de semillas por el método indirecto

ginal, las características de su banco de semillas y los regímenes de fuego, intervalo de tiempo, intensidad, extensión quemada y estación climática. Esta gavilla de factores interacciona con la resiliencia ecológica, es decir, con la capacidad que tiene un ecosistema de recuperarse tras una perturbación.

El banco de semillas del suelo comprende todas las simientes viables. Llamamos persistente al compuesto por semillas que permanecen en el suelo más de un año; no persistente, al de semillas que germinan en el mismo año en que se generan. En su doble forma, el banco ejerce una función de tampón ante las perturbaciones, aumenta la heterogeneidad genética de las especies y asegura la conservación de la diversidad específica.

En especies de reproducción sexual obligatoria, algunas jaras (género *Cistus*) por ejemplo, los incendios frecuentes pueden agotar hasta la extinción el banco de semillas de la especie al no permitir la renovación. En cambio, las especies que dependen de semillas almacenadas, aunque capaces también de recuperarse por medio del rebrote vegetativo, podrían volver a su situación de origen.

Habrá unas especies que se verán favorecidas por la elevada temperatura alcanzada en el suelo durante el paso del incendio. Pero la mayoría saldrán perjudicadas o incluso podrían morir. Muestra de lo primero es la brezina (*Calluna vulgaris*); de lo segundo, el brezo (*Erica australis*).

Brezina y brezo utilizan la vía vegetativa para su reproducción, motivo por el que ciertos autores pensaron que sus bancos de semillas serían muy pobres. Sin embargo, producen gran cantidad de semillas. Tras el paso del fuego, las semillas de brezina avivan su germinación. Lo contrario ocurre con el brezo. Podría llegarse a la sustitución de una comunidad vegetal por otra al aparecer especies que en ausencia de fuego nunca aparecerían en la comunidad original.

Si el incendio destruye totalmente el banco de semillas, pero la extensión quemada no fuera muy grande, la dispersión de comunidades vecinas suministraría las precisas para su recuperación. En el caso de extensiones muy grandes, los bordes del incendio recuperarían su banco de semillas de forma más rápida que en las zonas centrales.

La estación climática ejerce su influencia peculiar. Los fuegos de finales de otoño, invierno o primavera temprana, épocas más húmedas, apenas afectan a las semillas del suelo porque las temperaturas no llegan a ser muy elevadas. A finales de primavera o en verano, cuando el grado de humedad es menor, los incendios alcanzan temperaturas a ras del suelo muy altas con grave daño de las especies no persistentes.

El fuego deja su impronta no sólo en las semillas, sino también en las poblaciones microbianas del suelo y la densidad de depredadores, eliminando la competencia. Merced a lo último, aparecen especies que no lograrían establecerse en ausencia de perturbación y que tienen un efecto enriquecedor en el banco de semillas del suelo. Con todo, el fuego siempre acaba por mermar el número de semillas.

Mª Luz Valbuena
Area de Ecología.
Facultad de Biología.
Universidad de León

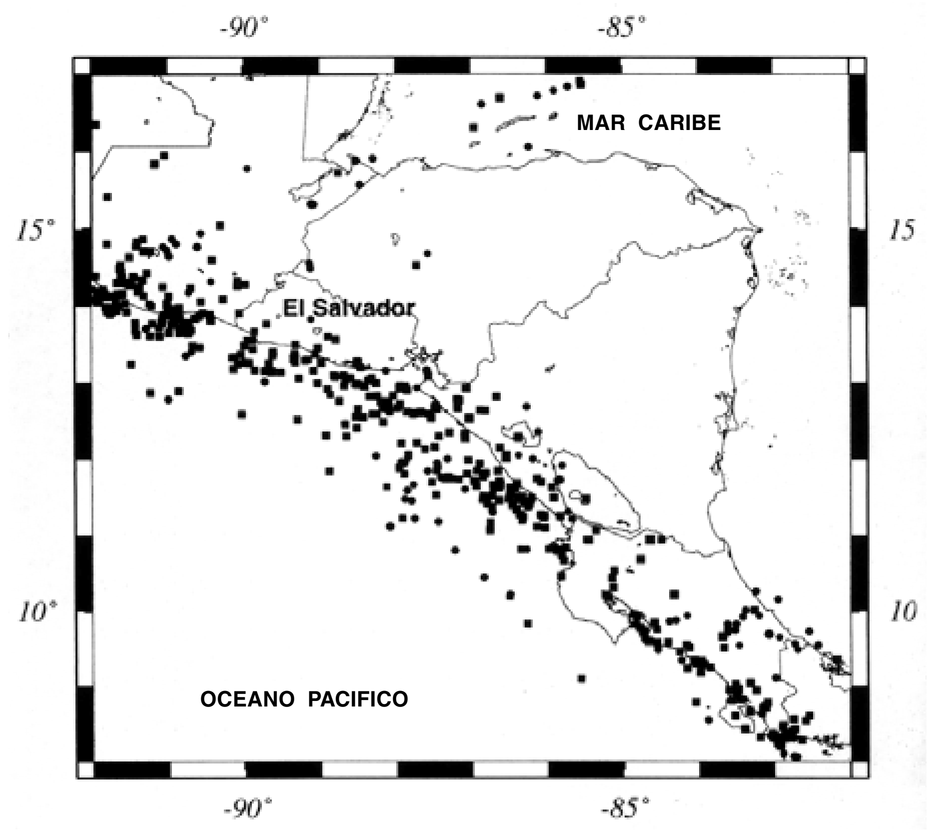
Colaboración eurohispanoamericana

Evaluación del riesgo sísmico en El Salvador

América Central es una de las regiones de más alto nivel de riesgo sísmico. Los terremotos, que se extienden todo a lo largo de la costa alcanzando magnitudes grandes (M = 8), producen numerosas víctimas y grandes daños materiales. Recuérdense los numerosos episodios de destrucción que han sufrido las capitales de Guatemala y Nicaragua en su historia.

Los terremotos deben su origen a la colisión en esta zona entre la placa de Cocos con la del Caribe. En el encuentro entre ambas placas se forma una zona de subducción, donde la litosfera oceánica se introduce por debajo de la continental con una velocidad de unos 6 cm/año, una de las más altas en el movimiento de las placas litosféricas.

El Salvador se ve afectado, además, por otros terremotos localizados en la cadena volcánica paralela a la costa en su interior. San Salvador, la capital, levantada sobre este eje volcánico, ha experimentado graves seísmos, los más recientes en 1965 y 1986. Esta situación motivó la realización de un proyecto financiado por



Terremotos en El Salvador y zonas adyacentes de Centroamérica

la Comunidad Europea entre 1995 y 1998, destinado a la evaluación del riesgo sísmico en dicho país.

En el programa participaron la Universidad Complutense de Madrid, coordinadora del proyecto, el Instituto Geográfico Nacional de Madrid, el Instituto de Física del Globo de París, el Colegio Imperial de Ciencia, Tecnología y Medicina de Londres y la Universidad Técnica Nacional de Atenas. Por El Salvador intervino la Universidad Centroamericana Simeón Cañas, de la capital mesoamericana.

La parte más importante del proyecto consistió en la instalación de una red de 10 estaciones de acelerógrafos digitales situados alrededor de la capital. Estas estaciones miden las aceleraciones del suelo producidas por terremotos cercanos. La información que proporcionan es la requerida por los ingenieros para el diseño de estructuras resistentes a movimientos intensos del suelo, como los que se esperan en terremotos como los sucedidos en 1965 y 1986.

Hasta la fecha, se han obtenido unos 30 registros. Durante el proyecto se formó al personal de la Universidad Centroamericana en las técnicas relacionadas con el análisis de datos de aceleraciones del suelo, estudios de sismicidad y riesgo sísmico con estancias en Madrid y Londres y en estancias en El Salvador de los científicos europeos participantes. Para la formación de los alumnos de ingeniería de la UCA en estos temas se publicó el libro "Fundamentos de Sismología" por A. Udías y J. Mezcua.

Durante el proyecto se realizaron estudios conducentes a la evaluación del riesgo sísmico en El Salvador. En primer lugar, la compilación de un catálogo de terremotos fiable con la relocalización de los terremoto desde 1894. Se ha compilado una base de datos digitales de acelerogramas de la región de Centro América con más de 1000 registros. Se ha llevado a cabo una búsqueda de documentos históricos de terremotos que han producido daños en El Salvador en el Archivo de Indias, encontrándose información sobre los terremotos de 1576, 1594, 1651, 1659, 1671, 1719 y 1798. Se ha hecho un estudio detallado de los terremotos de Jucuapa de 1954 que causaron graves daños y más de 400 víctimas.

Asimismo se ha investigado el mecanismo del foco de los terremotos de 1965, 1982, 1986 y 1992, correlacionándose los resultados con la tectónica de la región. Muchos de los trabajos emprendidos fueron debatidos en septiembre 1997, con ocasión de un seminario internacional sobre "Evaluación y Mitigación del Riesgo Sísmico en el Area de América Central".

Este es el primer proyecto financiado por la Comunidad Europea y coordinado por una institución española sobre riesgo sísmico en un país de Iberoamérica. El proyecto ha contribuido a la instalación de la adecuada instrumentación para la detección y registro de las aceleraciones del suelo debidas a los terremotos, a la formación de personal especializado en estos estudios y a la incorporación del estudio del riesgo sísmico en los planes de estudio de ingeniería civil en El Salvador.

AGUSTÍN UDÍAS
Universidad Complutense
de Madrid

Consumo de cocaína

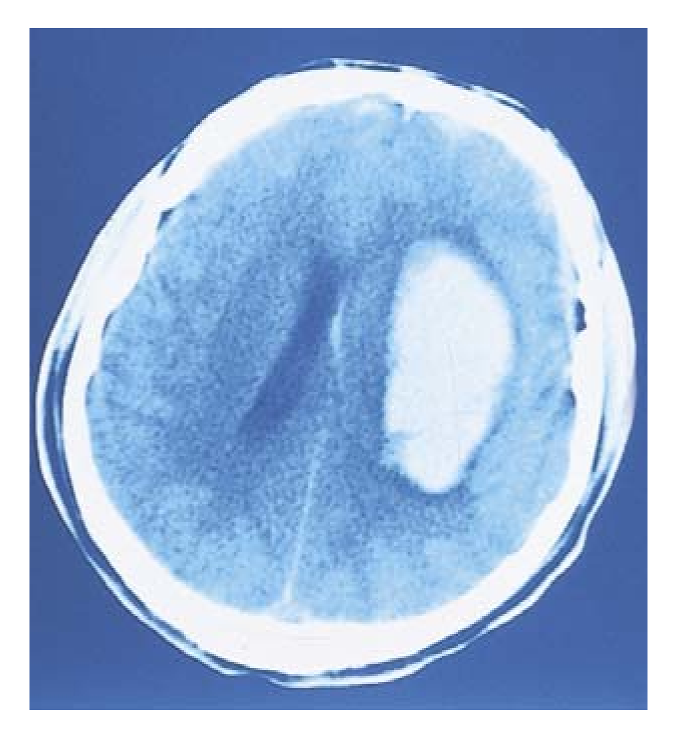
Complicaciones cardiovasculares y neurológicas

El aumento del consumo de cocaína ha provocado que numerosas complicaciones médicas desconocidas u olvidadas comiencen a ser frecuentes en los servicios de urgencia. Por su potencial letalidad, destacan las complicaciones cardiovasculares y las neurológicas.

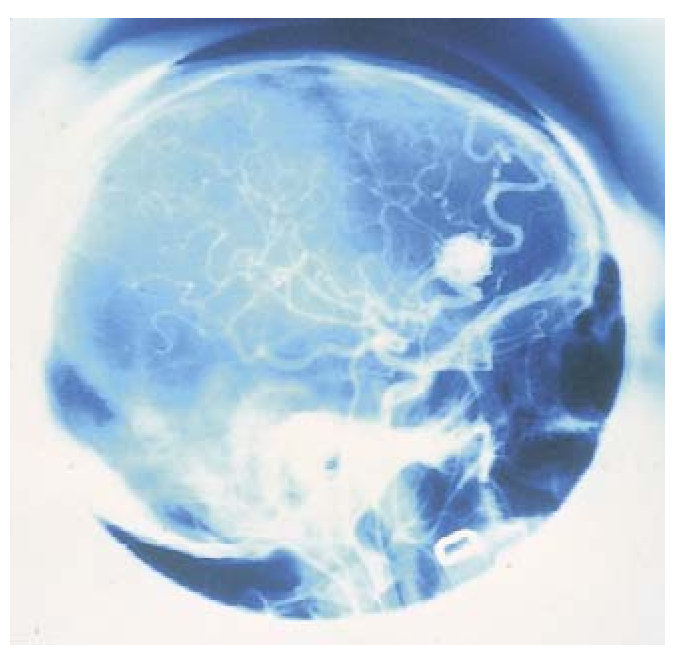
La medicina conoce múltiples complicaciones cardiovasculares, asociadas a diferentes mecanismos patológicos, como el vasoespasmo, aumento de las demandas de oxígeno, trombosis arteriales y venosas, o debidas a las sustancias adulterantes. Tales condiciones pueden desencadenarse con el consumo de droga, no requieren la existencia de una enfermedad cardíaca de base y no dependen de la dosis.

Con el uso de cocaína se han relacionado cuadros de angina o de infarto agudo de miocardio (IAM). El motivo de tal vinculación es triple: proximidad temporal del consumo con el episodio, manifestación del cuadro en jóvenes libres de otros factores de riesgo y aparición de posteriores infartos tras nuevo consumo de la droga.

A la hora de explicar el mecanismo último abundan las hipótesis. La aparición de IAM en pacientes con



Tomografía axial computarizada donde se muestra una hemorragia intraparenquimatosa en un consumidor de cocaína



Angiografía cerebral que pone de relieve una malformación arteriovenosa que sangró tras consumo de cocaína

coronarias normales avala la opinión según la cual el vasoespasmo sería un factor desencadenante del infarto o angina. Lo que es coherente con la propiedad vasoconstrictora de la cocaína.

La angina o infarto se ha atribuido también al aumento de la frecuencia cardíaca y de la presión arterial, que ocurre tras el consumo. Estas elevaciones acarrean graves repercusiones en pacientes con enfermedad cardíaca subyacente; el IAM podría producirse por aumento de las demandas de oxígeno.

El tercer mecanismo probable de infarto resultaría de la formación de trombosis en las coronarias. La recanalización de las coronarias tras la trombolisis respaldaría la idea de que en la trombosis reside el mecanismo fisiopatológico del IAM. Por otra parte, la cocaína puede producir agregación plaquetaria y favorecer la aceleración del proceso arteriosclerótico en consumidores crónicos. Por último, la presencia de sustancias adulterantes en la droga podría explicar algunos casos de infarto o angina.

Se ha recogido abundante información sobre pacientes con arritmias fatales y no fatales en relación con el consumo o con la intoxicación aguda por cocaína. Las más frecuentes son las taquiarritmias, sean ventriculares o supraventriculares. Uno de los mecanismos fisiopatológicos sugeridos para dar razón de ese potencial arritmogénico de la cocaína invoca a la isquemia. Otro mecanismo posible es su relación con la existencia de miocarditis e hipertrofia ventricular izquierda, problemas estos que se han asociado al consumo crónico de cocaína. Finalmente, parece demostrado un aumento en los niveles de catecolaminas tras el consumo de cocaína, lo que puede estar relacionado con la génesis de estas arritmias. En la investigación experimental con perros ha quedado patente que la cocaína produce arritmias letales, presumiblemente por bloqueo de los canales del sodio.

Las complicaciones neurológicas, igual que las cardiovasculares, pueden aparecer en sujetos hipertensos, personas con malformaciones arteriovenosas o en individuos sin enfermedad de base. Pueden ocurrir tras una primera dosis. Se han descrito hemorragias intraparenquimatosas y otras complicaciones. El mecanismo desencadenante puede ser la elevación de la tensión arterial con sangrado espontáneo. La aparición de espasmo vascular, la alteración del flujo cerebral con aparición de vasoconstricción, o la isquemia y sangrado de la zona infartada para los casos de infarto hemorrágico, también se han incriminado.

Desde 1984 se admite que la hemorragia subaracnoidea constituye una complicación del consumo de cocaína. La forma de presentación no difiere de la hemorragia secundaria a otra causa, con cefalea intensa a los pocos minutos u horas del consumo, disminución del nivel de conciencia, náuseas y vómitos. En los casos de malformación arteriovenosa, podía deberse a la elevación de la tensión arterial, con rotura de vasos. Se ha observado, asimismo, infarto cerebral asociado al consumo de cocaína, donde el mecanismo implicado es la hipertensión, vasoespasmo e isquemia. Estos cuadros podrían justificarse por el aumento de los niveles de serotonina que, como potente vasoconstrictor, reduce el flujo sanguíneo cerebral.

A veces, los cocainómanos sufren cefaleas y crisis convulsivas. La cocaína produce crisis por el estado hiperadrenérgico. Pero no hay que olvidar que en los cuadros de intoxicación aguda pueden manifestarse alteraciones metabólicas y del equilibrio ácido-base que justifican la aparición de crisis convulsivas. Menos frecuentes son las distonías, movimientos anormales e infecciones meníngeas, vinculadas al consumo de cocaína en polvo.

J. García Castaño
Dpto. Medicina Interna
Hospital G.U. “Gregorio Marañon”.
Madrid

De cerca

Texto y fotos: Claude Carre y Josep-Maria Gili

Medusas urticantes



1. Ejemplar adulto y solitario de la medusa Chrysaora hysoscella, *común en las costas mediterráneas*



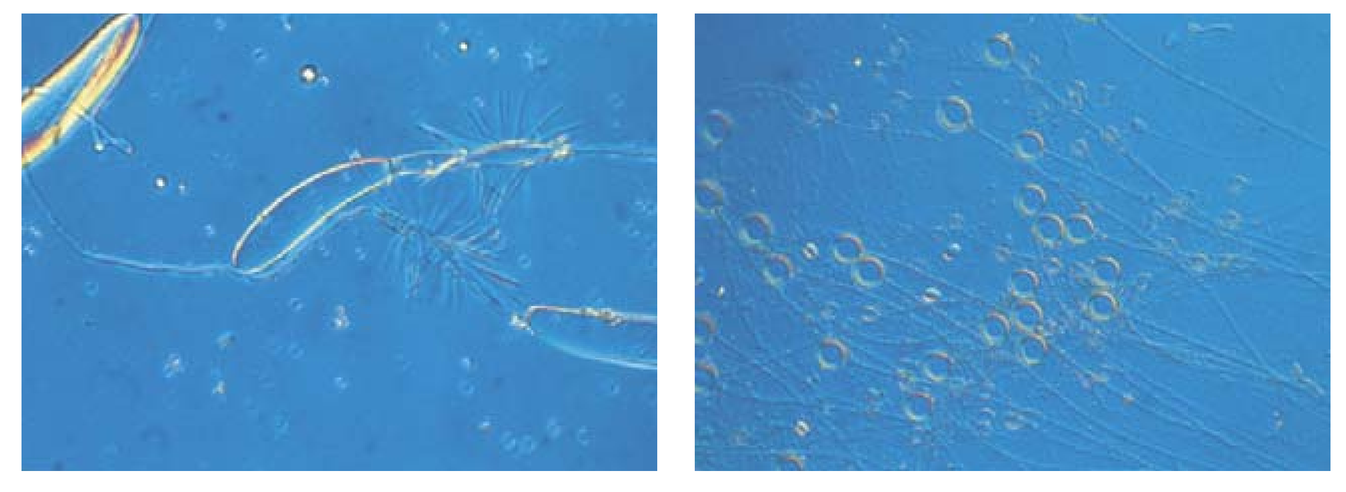
2. Medusa Rhizostoma pulmo *nadando en aguas someras de un puerto*

Los que en verano frecuentan las playas mediterráneas conocen muy bien un fenómeno propio de la estación, la llegada de manadas de medusas, arrastradas por las corrientes de masas de agua superficiales impulsadas por los vientos de mar a tierra. Son adultos que proceden de zonas situadas entre 20 y 40 millas de la costa, donde viven y se desarrollan. Arriban muertas y troceadas, pues no pueden resistir ni siquiera las corrientes de moderada intensidad.

Las medusas no atacan a sus presas, ni a los bañistas. Sólo los rozan con sus tentáculos, densísimos en células urticantes (unas mil por centímetro de longitud y de entre 5 y 15 micras de tamaño). Las células de los tentáculos o cnidocistos (*fotografías de microscopio*) carecen de control nervioso y se disparan por contacto físico o por un chock térmico o salino. El disparo no tarda más de tres milisegundos en producirse. De la célula emerge (se evagina, es la expresión técnica) un filamento, acompañado de dientes o garfios, que al contactar con las presas inyecta un veneno muy potente. Eso es lo que ocurre cuando un trozo de tentáculo roza la piel del bañista.

El veneno que se inyecta es mixotóxico para el corazón, la vascularidad pulmonar y la sistémica. Presenta a veces neurotoxicidad y generalmente produce efectos cutáneos y alérgicos serios. La virulencia de la "picadura" depende del estado de salud del bañista. Puede ser preocupante en niños y en personas con problemas neurológicos o asmáticos. No hay medida más adecuada que evitar el baño si se sabe de la presencia de medusas. Téngase en cuenta la posibilidad de choque anafiláctico si se sufre una segunda agresión.

3. Enjambre de juveniles (un mes después de la eclosión) de la medusa Pelagia noctiluca*, la especie más frecuente y que forma una mayor concentración de individuos en las playas mediterráneas*



4. Dos tipos de cnidocistos de Pelagia noctiluca *evaginados, donde se aprecian los filamentos que inyectan el veneno y las púas que les permiten agarrarse a la presa*

Canguros asesinos
y otros marsupiales sanguinarios

No todos los mamíferos australianos eran koalas encantadores. Los había feroces y espantosos

Stephen Wroe

1. UN CANGURO RATA GIGANTE, armado de dientes poderosos, salta sobre un joven bandicut de hocico tubiforme en una selva tropical. La escena se sitúa en el Mioceno de Australia, hace unos 15 millones de años. Observan el cuadro dos "leones" marsupiales (*Wakaleo vanderleuri*) y un ave del trueno (*Bullockornis planei*).



La bruma del amanecer envuelve la pluviselva de Riversleigh, en el noreste de Australia, un día cualquiera de hace 15 millones de años. Aparece una familia de bandicuts, dispuestos a hundir sus hocicos, cautelosamente, en una charca somera. Sus orejas se agitan, siempre alerta a un súbito crujido o un rumor en el sotobosque. Beber es siempre una operación arriesgada. De repente, una forma oscura y musculosa surge de un arbusto cercano, y atrapa de un salto a un joven bandicut. El poderoso fantasma empala a su víctima con los dientes, largos cuchillos, y se la lleva a un escondrijo tranquilo, para descuartizarla y devorarla a placer.

Es frecuente la muerte violenta en la naturaleza. No parece, pues, que merezca la pena detenerse en el triste final del pequeño bandicut. Sin embargo, esa muerte habría sorprendido a un observador moderno. El depredador era un canguro; con mayor precisión, un canguro rata gigante de dientes robustos (*Ekaltadeta ima*).

En la Australia del siglo XX, los depredadores de sangre caliente son pocos y están muy dispersos. Entre nuestros carnívoros nativos, los mayores son el cuoll de cola manchada (*Dasyurus maculatus*) y el diablo de Tasmania (*Sarcophilus harrisii*). (El dingo, un animal carnívoro parecido al perro, no es oriundo de Australia; fue introducido por el hombre hace entre 5000 y 4000 años.) Al cuoll de cola manchada, un marsupial que llega a pesar hasta siete kilogramos, se le denomina también "gato nativo", por su vago parecido con los gatos ordinarios, que son mamíferos placentarios. El diablo de Tasmania, otro marsupial, es algo mayor y parece un perrito faldero con una terrible cabeza de hiena. Quizá se trate del depredador menos remilgado del mundo, capaz de devorar un cadáver entero, dientes incluidos. Esta extraña pareja pertenece a la familia Dasiúridos, que incluye otros gatos nativos y los mucho más pequeños ratones marsupiales, insectívoros en su mayoría.

Algunos autores han sugerido que Australia nunca poseyó un contingente importante de grandes carnívoros homeotermos. Tim Flannery, de la Universidad de Harvard, ha afirmado recientemente que su evolución se vio limitada por la pobreza de los suelos y las variaciones erráticas del clima a lo largo de los últimos 20 millones de años. Tales dificultades, aduce, restringieron la biomasa vegetal, con la reducción consiguiente del tamaño y la cuantía de las presas potenciales. En cambio, postulan Flannery y otros, el nicho de los grandes carnívoros terrestres lo ocuparían reptiles como el lagarto pleistocénico *Megalania prisca*, de siete metros de longitud. Los depredadores de sangre fría requieren menos alimento que los de sangre caliente y, de este modo, prosiguen los defensores de esta hipótesis sustitutiva, tenían más probabilidades de sobrevivir ante condiciones difíciles.

Pero semejante explicación ha quedado en entredicho con los espectaculares descubrimientos de Riversleigh, sobre todo. En 1900, un naturalista europeo, W. E. Cameron, advirtió por primera vez la presencia de fósiles en ese remoto lugar de Queensland. Pero Cameron creía que se trataba de restos muy recientes, de menos de dos millones de años de antigüedad. Además, la impenetrabilidad de Riversleigh (el calor y las lluvias monzónicas estivales sólo permiten excavar en invierno) determinó que los paleontólogos dejaran de lado el lugar durante décadas. Hasta que, en 1963, Richard Tedford, del Museo Americano de Historia Natural en Nueva York, y Alan R. Lloyd, de la Oficina Australiana de Recursos Minerales, se aventuraron. Se encontraron con unos fósiles más interesantes y antiguos que lo que se suponía. Pero tenían en contra su carácter fragmentario y la dificultad que entrañaba el desenterrarlos.

Pese a todo, sus hallazgos alentaron la partida de otras expediciones a Riversleigh. En 1983, Michael Archer, mi antiguo director de tesis, encontró un verdadero filón. En un momento de descanso en las excavaciones, miró a sus pies y descubrió un fragmento de roca que resultó contener tantas nuevas especies de mamíferos del Terciario australiano cuantas se habían descrito en los siglos anteriores. Desde entonces, han ido aflorando nuevas especies a un ritmo prodigioso, entre las que se cuentan las de grandes carnívoros. Muchas de ellas se conservan en un estado excelente; podrían incluso confundirse con restos de animales fallecidos unas semanas atrás.

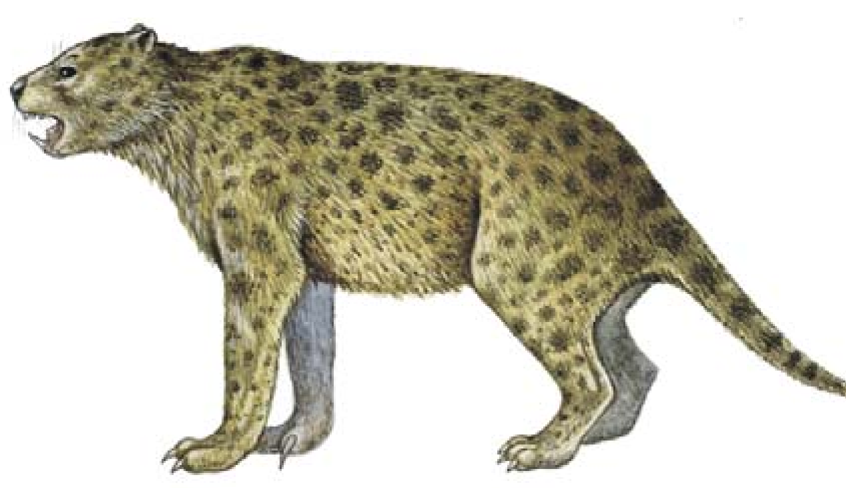
Al parecer, la mayoría de estos animales quedaron atrapados en cuevas de caliza. Sus huesos, que el agua rica en carbonato cálcico preservó de una forma rápida y perfecta, son testimonio de una fauna extinguida, constituida por animales tan mortíferos como los actuales, pero mucho más extraños. Desde 1985, se han hallado en Riversleigh casi una decena de nuevas especies, todas ellas del tamaño del cuoll de cola manchada o mayores, lo que ha duplicado con creces la lista de grandes carnívoros que vivían en Australia hace más de cinco millones de años. Este bestiario incluye ahora dos especies de canguros rata gigantes, nueve especies de "lobos" marsupiales, cinco especies de "leones" marsupiales y un gato nativo.

Los canguros rata gigantes (Propleopinos) son parientes cercanos del canguro rata almizclado. Esta fierecilla, que

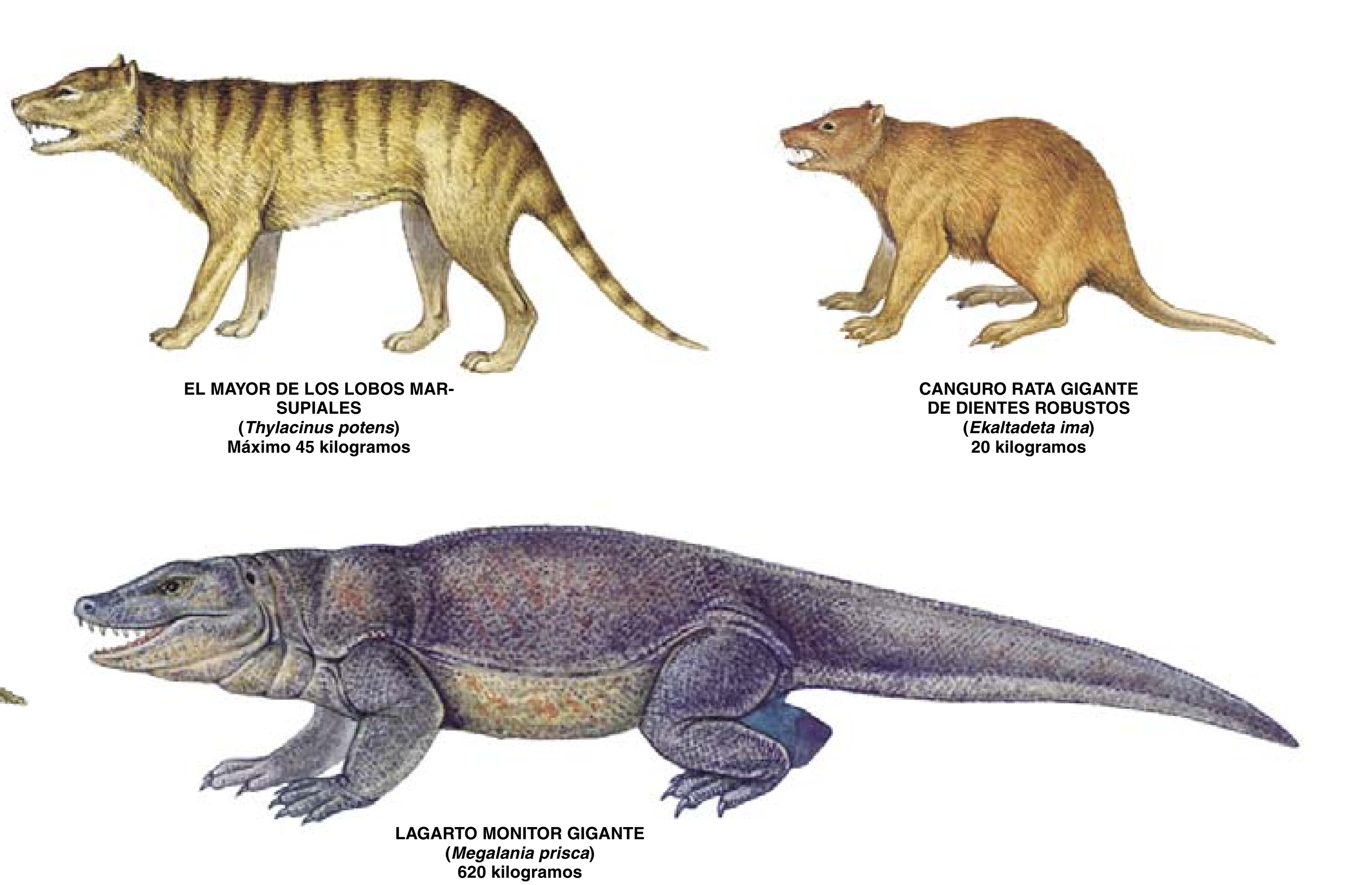
STEPHEN WROE acaba de doctorarse en paleontología por la Universidad de Nueva Gales del Sur en Sydney. Ha publicado muchos trabajos sobre la evolución de los marsupiales carnívoros australianos, vivos y extintos. Las ilustraciones del texto se basan en reconstrucciones realizadas por Anne Musser, de la Universidad de Nueva Gales del Sur.

Galería de depredadores

Los formidables carnívoros de la antigua Australia incluían un león marsupial (*debajo*), un lobo marsupial (*derecha, arriba*), un canguro rata gigante (*extremo derecha*) y un enorme lagarto (*derecha, abajo*). El mayor canguro rata, *Propleopus oscillans* (que pesaba 60 kilogramos), el "león" y el lagarto sobrevivieron hasta épocas relativamente recientes. No se descarta que atacaran al hombre. —*S.W.*



EL MAYOR DE LOS LEONES MARSUPIALES (*Thylacoleo carnifex*) de 130 a 260 kilogramos



EL MAYOR DE LOS LOBOS MARSUPIALES (*Thylacinus potens*) Máximo 45 kilogramos

CANGURO RATA GIGANTE DE DIENTES ROBUSTOS (*Ekaltadeta ima*) 20 kilogramos

LAGARTO MONITOR GIGANTE (*Megalania prisca*) 620 kilogramos

pervive en las pluviselvas de Queensland, no pesa ni un kilogramo, razón suficiente para que se la confunda con un múrido. Se alimenta de vegetales y de pequeños animales. De los canguros actuales es el único que no puede saltar. Fósil viviente, constituye el postrer y mínimo representante de una familia que incluía algunos ejemplares fornidos y de aspecto temible. Los canguros rata gigantes pesaban entre 15 y 60 kilogramos. Y, al igual que su diminuto descendiente, es probable que anduvieran a cuatro patas.

Los lobos marsupiales (Tilacínidos) y los leones marsupiales (Tilacoleónidos) reciben este nombre debido a su parecido, superficial, con cánidos y félidos. En realidad guardaban un parentesco más estrecho con los canguros. Al último lobo marsupial se le llamó tigre de Tasmania, por las listas de su grupa. A tan infeliz denominación le siguió su exterminio, temerosos los colonos de sus ataques a las ovejas. Lo mismo que los felinos, los leones marsupiales poseían un cráneo corto, ancho y potente, y probablemente ocupaban nichos ecológicos similares; su tamaño variaba entre el de un gato doméstico y el de un león. Aunque ningún fósil conserva traza alguna de marsupio, las características especializadas de los huesos, que comparten con los animales actuales, no dejan lugar a dudas de que eran marsupiales.

Una selva aterradora

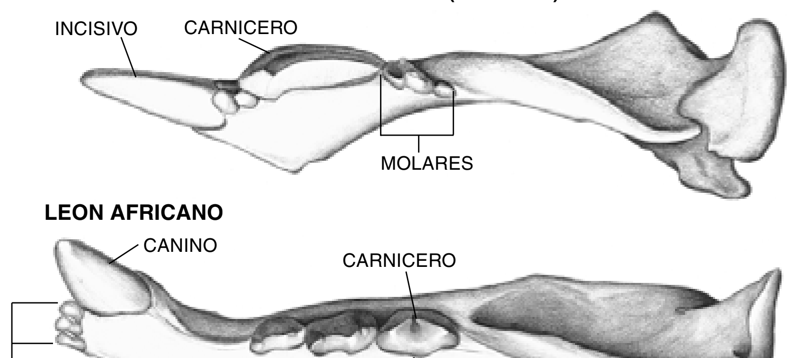
Durante gran parte del Mioceno (época que se extendió desde hace 25 hasta hace cinco millones de años), Australia estuvo tapizada de verde de un extremo a otro; la pluviselva cubría muchas áreas que hoy son sabana o desierto. Estas junglas, verdaderos generadores de evolución, albergaban mucha más diversidad biológica que cualquiera de los hábitats australianos modernos. Una excursión por una de esas espesuras estaría llena de sorpresas, no exentas de peligro.

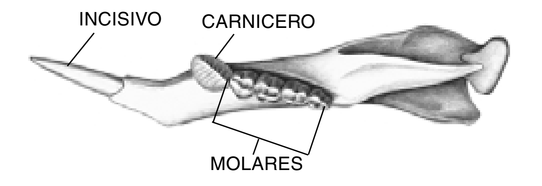
No hubiera sido agradable encontrarse con el canguro rata gigante de dientes robustos, uno de los canguros rata más antiguos (se han descrito otras cinco especies a partir de depósitos más recientes). *Ekaltadeta ima* era asimismo la especie menor, con un peso entre los 10 y 20 kilogramos. Sus fósiles, bien representados por dos cráneos casi completos, nos proporcionan la mejor base para conocer los hábitos alimentarios de los canguros rata gigantes.

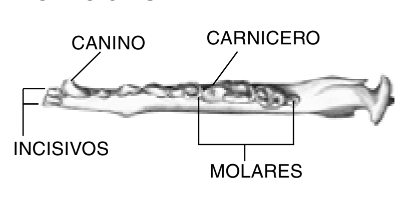
Puesto que estos animales descendían de marsupiales herbívoros, la interpretación de su biología está rodeada de cierta controversia. Hay acuerdo en que incluían carne en su dieta, según se desprende de la morfología del cráneo y de los dientes.

La imaginación popular acostumbra representar los carnívoros feroces con grandes caninos. Lo podemos tomar por cierto, salvo algunas excepciones. El hombre consume gran cantidad de carne (más que algunos de los animales que denominamos carnívoros), pero posee caninos pequeños, dientes que son grandes en los gorilas, de hábitos vegetarianos. El auténtico carácter distintivo de un mamífero carnicero terrestre estriba en un grupo peculiar de dientes maxilares que se utilizan para cortar y sajar.

En los miembros menos especializados de los carnívoros placentarios, así como en los clanes de los canguros rata gigantes y de los leones marsupiales, los últimos dientes (de dos a cuatro) de ambos maxilares son molares anchos; se utilizan sobre todo para triturar material vegetal. Frente a estos molares hay unas láminas verticales cortantes, los dientes carniceros, aptos para







2. LOS DIENTES CARNICEROS (láminas verticales para sajar carne y cuero) son la marca distintiva de los mamíferos carnívoros terrestres. En carnívoros muy especializados, como el león marsupial y el león africano, se ha modificado un único diente a cada lado de los maxilares superior e inferior para dicha tarea; todos los molares situados detrás de este carnicero se han reducido o perdido. (*Sólo se ilustra el maxilar inferior*.) Los carnívoros generalizados, como los canguros rata gigantes y los zorros, que consumen también muchos vegetales, conservan los molares trituradores.

sajar músculos, cueros y tendones. Sin embargo, en cada uno de estos tres grupos, los dientes carniceros de las especies más carnívoras son muy grandes, mientras que los dientes que procesan material vegetal se encuentran reducidos, cuando no faltan. La boca de un gato doméstico, por ejemplo, presenta los dientes maxilares de un animal carnívoro muy especializado.

Por tanto, la importancia proporcional de los dientes carniceros con respecto de los trituradores en la maxila ofrece una clave sólida para inferir cuánta carne devoraba. En este sentido, los canguros rata gigantes se parecían a los zorros, cánidos oportunistas en alimentación y dotados de una gran capacidad de trituración. El cráneo de *E. ima* presentaba más atributos típicos de carnívoros. Su arquitectura poderosa sustentaba masas musculares de cuello y mandíbula, obligadas en los depredadores para dominar a las presas que se resisten. Aunque nunca desarrolló largos caninos en la mandíbula inferior, sus incisivos inferiores frontales se convirtieron en cuchillas laminares.

Apoyados en esas bases, varios investigadores sostienen —y yo comparto— que los canguros rata gigantes eran omnívoros. Consumían carne, si podían, y complementaban su dieta con productos vegetales. Estos renegados del clan de los canguros aterrorizaron el continente australiano durante al menos 25 millones de años. Se extinguieron en algún momento de los últimos 40.000 años.

Al tiempo que cuidara esquivar el ataque de canguros carniceros, el hombre que penetrara en la selva australiana del Mioceno no debería despreciar las ramas bajas. En los árboles tenían su hogar los leones marsupiales. Otra sorpresa nada bienvenida. Igual que los canguros rata







3. ULTIMOS representantes de un muestrario de depredadores australianos antaño muy variado. No carece de ferocidad el diablo de Tasmania (*izquierda*), ni el cuoll de cola manchada (*derecha*), un “gato” aborigen, ni el canguro rata almizclado (*arriba*), postrero de una estirpe que se remonta hasta los canguros rata carnívoros gigantes.



4. CRANEO FOSIL del canguro rata gigante de dientes robustos. Destacan los temibles incisivos y los carniceros aserrados (parecidos a conchas de berberecho) que le habrían permitido matar y consumir eficientemente a su presa. El cráneo mide 145 milímetros de un extremo a otro, y la mandíbula inferior tiene 122 milímetros.

gigantes, las cuatro especies de "leones" del Mioceno evolucionaron a partir de formas herbívoras y pacíficas. Las especies primitivas poseían dientes molares generalizados, típicos de omnívoros, así como hojas carniceras. En otras especies, los molares trituradores se han reducido, si no perdido; los dientes cortadores de carne alcanzan notable tamaño.

Ocho especies de leones marsupiales al menos han recibido la oportuna descripción académica. En el estudio de otras dos trabaja Anna Gillespie, de la Universidad de Nueva Gales del Sur en Sydney. En torno a la biología de los leones marsupiales se ha discutido mucho. En cuanto marsupiales vombatomorfos, sus parientes vivos más cercanos son los koalas y los uómbats. Tiempo atrás, los paleontólogos, influidos por el estrecho parentesco de estos "leones" con marsupiales herbívoros, les negaron la posibilidad de un hábito carnívoro. Tejieron una serie de razonamientos inverosímiles que culminaron en la chusca hipótesis de que se habían especializado en comer melones. (Puesto que los dientes apenas podían moler, se suponía que el alimento tenía que ser muy blando.)

Nadie rechaza ahora que los leones marsupiales eran carniceros. Para muchos, la especie más reciente, *Thylacoleo carnifex*, fue también el mamífero carnívoro más especializado que jamás se haya conocido. Prescindía de los dientes procesadores de material vegetal, mientras que la complejidad de sus dientes carniceros carecía de parangón. Sin potentes caninos, debía valerse de sus largos incisivos para matar.

T. carnifex es el único león marsupial del que se ha recuperado el esqueleto completo. Hay quien le otorga el tamaño de un lobo grande o de un leopardo. Pero quienes así opinan, creemos otros, no han atendido a la vigorosa robustez del esqueleto, que bien pudo pertenecer al de una criatura cuyo peso fuera el de un león moderno. Está adaptado para la potencia, no para la resistencia; portaba unas extremidades anteriores muy musculosas. Con dientes como navajas y una garra enorme y envainada (parecida a la hoja de un cuchillo de resorte) al final de cada pulgar semioponible, habría sido un depredador pavoroso en cualquier continente.

Saltadores con bolsa

No cabe duda de que *T. carnifex* estaba preparado para la captura de presas grandes, mayores incluso que él mismo. Aunque se ignora la finalidad exacta de su garra pulgar, lo innegable es que, una vez aprehendidos en el abrazo potentísimo de un león marsupial, pocos animales habrían sobrevivido.

Los leones marsupiales del género *Wakaleo* eran menores; de la talla aproximada del leopardo. Las especies de *Wakaleo* (y posiblemente de *Thylacoleo*) no estaban preparadas para la carrera veloz, aunque eran poderosamente vigorosas. Quizá se especializaran en el asalto aéreo, lanzándose desde los árboles sobre la víctima, a la manera del leopardo. En el otro extremo de la escala, y con un tamaño parecido al del gato doméstico, *Priscileo roskellyae* pudo haberse concentrado en la captura de presas arborícolas. Dado su tamaño y su idoneidad para la depredación, lo más probable es que los grandes leones marsupiales se situaran en lo alto de la pirámide alimentaria australiana. Además, *T. carnifex* vivió al menos hasta hace 50.000 años, suficiente para poder haber atacado al hombre.

En el suelo de la selva dominaban los lobos marsupiales. Cuando los europeos llegaron a Australia hace más de 200 años, sólo encontraron dos familias de marsupiales con representantes carnívoros. Se trataba de los "lobos" (de los que quedaba el tigre de Tasmania) y de los Dasiúridos, un grupo mucho más numeroso. Estos últimos, aunque feroces, son en su mayoría diminutos y su peso acostumbra medirse en gramos, no en kilogramos. Se han descrito unas 60 especies vivas.

Ante la diversidad específica de los Dasiúridos, la mayor observada, creíamos que abundarían también más que los Tilacínidos en el pasado remoto. Nos equivocamos. Desde 1990 se han desenterrado siete nuevas



5. EL ARBOL FILOGENETICO de los marsupiales australianos incluye cuatro familias con miembros carnívoros (*en rojo*). En paréntesis se señala un representante de cada una.

¿Un ave asesina?

En noviembre de 1998, Peter Murray y Dirk Megirian, del Museo de Australia Central, describieron unos nuevos fósiles pertenecientes a un ave terrestre extinguida llamada *Bullockornis planei*. Esta especie pertenece a la familia australiana de los Dromornítidos, las aves del trueno. Se conoce desde 1839. Los Dromornítidos podían ser enormes. Algunos quizá pesaban 500 kilogramos o más. Al conservarse muy poco material craneal, no se podía asegurar gran cosa sobre su biología. Ante la escasez de material disponible, y la opinión mayoritaria de un estrecho parentesco de los Dromornítidos con aves de hábitos fitófagos, se dio por bueno que estos gigantes eran herbívoros. Pero la excelente reconstrucción que Murray ha hecho de *B. planei* es sorprendente: muestra una cabeza voluminosa que posiblemente tenía más de medio metro de longitud. Es más, los puntos de inserción de los músculos eran poderosos. ¿Qué comía un ave de media tonelada de peso con músculos mandibulares contundentes y un pico en el que hubiera cabido un balón de fútbol?



En 1991, Lawrence M. Witmer y Kenneth D. Rose argumentaron de manera convincente que el pico voluminoso y la musculatura mandibular de *Diatryma*, un ave extinta de Norteamérica y Europa, habría constituido un "error grave" de diseño a menos que el ave fuera carnívora. Siguiendo esta línea de razonamiento, he avanzado la hipótesis de que al menos algunos dromornítidos podrían haberse alimentado de vertebrados, vivos o carroña. Si así fuera, las aves del trueno hubiesen sido los mayores carnívoros sobre dos patas desde la desaparición de los dinosaurios con idénticas preferencias dietéticas.

—*S.W.*

especies de "lobos" del Mioceno, lo que hace un total de nueve (incluido el tigre de Tasmania) para la familia, y se están preparando las descripciones de otras cuatro. En cambio, sólo se ha descrito un ejemplar claro de dasiúrido a partir de depósitos miocénicos. Aunque es posible que algunas especies, conocidas a partir de un registro fragmentario, resulten ser dasiúridos, la proporción de especies de lobos marsupiales a especies de Dasiúridos durante el Mioceno contrasta mucho con esa razón hoy.

El tigre de Tasmania es el único tilacínido de cuya biología y comportamiento se tienen datos directos, aunque han de tomarse con reservas. Una cosa es segura: el tigre de Tasmania se asimilaba a la mayoría de los cánidos en su hábito, enteramente terrestre, en su hocico, largo, y en las presas, a buen seguro notablemente menores que él. Pero difería de los cánidos en su escasa habilidad para la carrera y su preferencia por la caza en solitario. Por no hablar de su maxila, adaptada a una dieta completamente carnívora.

En los Tilacínidos y los Dasiúridos la disposición de los dientes difiere de la mayoría de los demás carnívoros. Cada molar conserva en ellos la doble capacidad de triturar y de cortar verticalmente. Así, en cada diente molar de los carnívoros de este tipo las superficies trituradoras están reducidas y, aumentada, la capacidad de corte vertical.

Los lobos marsupiales eran fundamentalmente carnívoros, aunque los menos robustos y poco especializados podrían introducir insectos en su dieta. Varios de estos animales se apartaban todavía más del modelo de los cánidos. Algunos "lobos" del Mioceno eran pequeños en comparación con el tigre de Tasmania; la especie *Wabulacinus ridei* tenía un cráneo corto, más parecido al de un gato. Ni siquiera podemos estar seguros de que todos los tilacínidos miocénicos fueran deambuladores, pues de la mayoría sólo conocemos fragmentos de cráneos y mandíbulas. Una excepción a destacar es un individuo de 15 millones de años de edad recién descubierto en Riversleigh. Su cráneo y la mayor parte de su esqueleto nos han llegado en magnífico estado de conservación. Podemos estar razonablemente seguros de que, por lo menos éste, vivía sobre el suelo.

Henk Godthelp, Archer y el autor acaban de hacer pública la descripción de un marsupial del tamaño de un ratón, procedente de un yacimiento de unos 55 millones de años de antigüedad en Murgon, en el sureste de Queensland. Esta nueva especie tiene una dentición generalizada; y tan primitiva, que resulta muy difícil establecer la relación que guarda con otros marsupiales. Podría muy bien tratarse de un antepasado de Tilacínidos y Dasiúridos, si no de todos los marsupiales australianos. Cabe también que esta nueva especie no pertenezca a los Australidelfios (categoría taxonómica que abarca todos los marsupiales australianos actuales), sino al grupo Ameridelfios, en su mayoría marsupiales sudamericanos.

En el pasado, Sudamérica y Australia estuvieron unidas, Antártida mediante, en el continente de Gondwana. Los marsupiales llegarían a Australia desde Sudamérica. Algunos han sugerido que sólo los mamíferos Australidelfios habrían penetrado en Australia antes de la fragmentación total del Gondwana. A la luz del hallazgo de este nuevo fósil, esta conclusión podría ser prematura.

Muerte a los asesinos

Una vez ha quedado establecida la notable diversidad de especies entre los grandes marsupiales carnívoros de Australia durante el Mioceno, la paleontología debe abordar su trayectoria evolutiva. No hace tanto tiempo que se extinguieron los últimos leones marsupiales y canguros rata gigantes (*T. carnifex* y *Propleopus oscillans*, respectivamente). Es incluso probable que pervivieran con los primeros aborígenes australianos, hace 50.000 años o más. De ahí que algunos expertos hayan considerado al hombre su exterminador.

De momento no se ha podido ratificar ni rechazar la culpabilidad humana en ese asunto. El debate sigue abierto. Los aborígenes promovieron la desaparición del tigre de Tasmania al introducir al dingo. Menos palmaria es su influencia con respecto a otras especies. Tal vez no se resuelvan nunca estas cuestiones, pero el registro fósil deja una cosa clara: la diversidad de los carnívoros marsupiales alcanzó su apogeo entre el Mioceno temprano y el medio, y se encontraba en pleno declive mucho antes de que llegaran los seres humanos. A este propósito, cinco lobos marsupiales por lo menos vivieron durante el Mioceno medio, y dos

coexistieron en el Mioceno tardío, pero el hombre sólo coincidió con uno de ellos.

Operaba, eso es evidente, otro factor que nada tenía que ver con la presencia del hombre. Los aborígenes se limitaron quizás a acelerar un proceso de extinción que desde hacía tiempo venía desarrollándose. La sequía, probablemente. Desde el Mioceno medio, Australia estuvo sometida a glaciaciones cada vez más duras, así como a reducciones de la pluviosidad y del nivel del mar. Esta tendencia tuvo su máximo durante los últimos dos millones de años, aproximadamente, cuando la sucesión de unas 20 edades del hielo expuso a la fauna australiana a una tensión enorme. La última de estas edades del hielo, aunque severa, no fue la peor.

Según una opinión bastante extendida, la combinación de cambio climático y presión andrógena produjo la desaparición de la mayoría de los grandes herbívoros que sobrevivían en el continente. Al extinguirse éstos, empezó la cuenta atrás para los depredadores marsupiales de Australia. De las decenas de grandes y magníficos carnívoros marsupiales que han existido, no sólo en Australia sino también en las dos Américas, sólo sobreviven en la actualidad el cuoll de cola manchada y el diablo de Tasmania. Un dato lamentable. Los australianos de origen europeo deben aceptar su responsabilidad absoluta en la pérdida inexcusable del tigre de Tasmania. La historia no nos perdonaría que les reserváramos el mismo destino a nuestros dos últimos asesinos con marsupio.

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

RIVERSLEIGH: THE STORY OF ANIMALS IN ANCIENT RAINFORESTS OF INLAND AUSTRALIA. M. Archer, S. Hand y H. Godthelp. Reed Books, 1994.

KILLER KANGAROOS. S. Wroe en *Australasian Science*, vol. 19, número 6, págs. 25-28; julio 1998.

THE GEOLOGICALLY OLDEST DASYURID, FROM THE MIOCENE OF RIVERSLEIGH, NORTHWESTERN QUEENSLAND. S. Wroe en *Palaeontology* (en prensa).

La página de Riversleigh de la Sociedad Australiana de Paleontología en la red puede encontrarse en www.ozemail.com.au/~promote1/ auspalaeo/index.html.

Ada y la primera computadora

La colaboración entre Ada, condesa de Lovelace, y Charles Babbage, precursor de la computación automática, fructificó en un artículo clásico donde describía el modo de programar el primer ordenador de la historia

Eugene Eric Kim y Betty Alexandra Toole

Aunque llamado "loco y malvado" por su conducta desenfrenada, el padre de Augusta Ada King ocupa un lugar destacado en el panteón de la fama con el título de Lord Byron. Ada heredó de su padre poeta el talento literario y la pasión por la vida. Hermosa y coqueta, se codeó con la elite de la sociedad inglesa. Murió a los 36 años, a la misma edad que su progenitor. También ella pasó a la posteridad por lo que escribió.

Ada publicó en 1843 una colección de influyentes notas, en las que describía el Ingenio Analítico de Charles Babbage, la primera computadora automática de aplicaciones generales jamás proyectada. Aunque nunca se construyó la máquina —debido, sobre todo, a que Babbage no consiguió reunir los fondos necesarios—, en las notas de Ada figuraba un programa para calcular mediante el Ingenio una sucesión de valores numéricos, la de los números de Bernoulli.

Las notas de Ada han dejado su impronta en las ciencias de cómputo, pero su linaje y su vida fascinante —amén de su papel de precursora en una ciencia donde la representación femenina ha sido siempre de escasez notoria— la han convertido en figura de referencia. Protagonista de biografías, ha inspirado novelas y obras dramáticas. En febrero pasado, Fox Lorber estrenó una película, *Conceiving Ada*, que recrea con libertad la vida de Ada Lovelace. Y aun siendo muchas las mujeres que han contribuido al avance de la informática, sólo Ada cuenta con un lenguaje de programación que lleve su nombre; es utilizado sobre todo para aplicaciones militares y aeroespaciales.

No es sorprendente que las aportaciones de Ada a las ciencias de cómputo hayan sido exageradas por unos y desdeñadas por otros, ni que el auténtico valor de su legado haya suscitado controversias. Es frecuente, por ejemplo, proclamar que fue Ada la primera en programar ordenadores. (Fue Babbage, y no Ada, quien confeccionó los primeros programas para su Ingenio Analítico, aunque apenas ninguno fuera publicado.) Otros, injustamente, le niegan a Ada la autoría del programa que figura en las notas, e incluso de las notas mismas.

La verdad se encuentra a medio camino. El propio Babbage caracterizó perfectamente las aportaciones de Ada al llamarla "su intérprete". Cierto es que discutió con ella las notas y revisó los primeros borradores, pero no cabe duda de que la autora fue la propia Ada. Mientras que los trabajos de Babbage sirvieron de base a las ideas y las notas de Ada, su lúcida redacción revelaba una comprensión propia y singular de la importancia del Ingenio Analítico y de las muchas posibilidades que ofrecía.

Augusta Ada Byron nació en Londres el 10 de diciembre de 1815, hija de Lord Byron y de la matemática Annabella Milbanke, matrimoniados once meses antes. En la época del nacimiento de Ada, su madre albergaba ya reservas serias sobre la convivencia con Byron. Circulaban rumores, muy probablemente iniciados por Carolina Lamb, prima de Annabella, de que Byron había tenido una aventura con su hermanastra, lo que dio pie a Annabella para separarse de él. Byron abandonó Inglaterra en abril de 1816. Nunca volvió a ver a su hija.

Lady Byron educó a la pequeña con la intención de hacer de ella una matemática y científica, y se esforzó en apartarla de sus inclinaciones literarias, en parte, para distanciarla de su padre. Ada recibió una excelente educación: le enseñó matemáticas Mary Somerville, una científica prominente, notoria, sobre todo, por sus traducciones de las obras de Pierre Simon de Laplace. Participó también en su formación el lógico y matemático Augustus De Morgan.

La educación matemática de Ada era insólita para su época, incluso entre la nobleza. Aunque durante la primera mitad del siglo XIX las matemáticas florecían en el continente, en Gran Bretaña dejaban mucho que desear. A su revitalización estaban contribuyendo De Morgan, George Peacock y Charles Babbage. Pero la educación matemática de la juventud, femenina especialmente, seguía en un estado penoso. Sin embargo, bajo la tutela de De Morgan, Ada llegó a imponerse en los principios del álgebra, la lógica y el cálculo.

El 5 de junio de 1833, Ada, que contaba 17 años, asistió a una fiesta en la que conoció a Babbage, un viudo de 41 años, famoso por su activismo político y por su trabajo en matemáticas y en economía. Pocas semanas después de aquel encuentro, Babbage le mostró a Ada su Ingenio de Diferencias, todavía incompleto, una primitiva máquina de calcular [*véase* "La computadora mecánica de Charles Babbage", por Doron D. Swade, INVESTIGACIÓN Y CIENCIA, abril de 1993]. Ada quedó cautivada. Durante los años siguientes, siguió de cerca el desarrollo del Ingenio de Diferencias, estudiando los pocos artículos publicados y discutiéndolos con Babbage.

Diseñó éste el Ingenio de Diferencias pensando en crear una máquina que generase tablas matemáticas y automatizase los pasos "mecánicos" del cálculo. Aunque



1. ADA LOVELACE posó para este retrato de A. E. Chalôn hacia 1838, varios años después de su primer encuentro con Charles Babbage, diseñador de la primera computadora del mundo. El sello de la izquierda fue emitido en 1991 por el servicio de correos británico para conmemorar el bicentenario del nacimiento de Babbage. En el fondo vemos ideas de programación esbozadas por Babbage. Posteriormente, Ada generalizó sus propuestas.

eficiente, era computacionalmente limitada. Además de sumar y restar, podía resolver una serie de ecuaciones polinómicas (como la $0 = a + bx + cx^2 + dx^3 ...$).

Babbage, sin embargo, había empezado a pensar en cosas mejores. Cuando la amistad entre ambos fue más profunda, comenzó a confesarle su proyecto de una nueva máquina, harto más avanzada que el Ingenio de Diferencias. Babbage la bautizó Ingenio Analítico, y dedicó los 38 años restantes de su vida a refinar los planes para construirla.

De acuerdo con los diseños de Babbage, el Ingenio Analítico se hallaría exento de las limitaciones del Ingenio de Diferencias. Concebido con la intención de resolver problemas computacionales de carácter general, habría de poseer una arquitectura similar a la de los ordenadores de nuestros días, compuesta por un "almacén" (memoria), un "molino" (unidad central de procesamiento; CPU, en inglés) y un sistema de lectura de tarjetas perforadas (dispositivo de entrada). Babbage se proponía basar en tarjetas perforadas la codificación de la entrada de datos (una idea tomada del telar Jacquard, capaz de crear automáticamente, mediante tarjetas de ese tipo, motivos textiles). La salida del ingenio podría adoptar la forma de una página impresa o de fichas perforadas. El Ingenio Analítico efectuaría sumas, restas, multiplicaciones y divisiones. Ejecutaría o repetiría un conjunto de instrucciones, atendiendo a ciertas condiciones ("si ocurre *x*, entonces *y*"), noción que es central en la informática moderna, donde recibe el nombre de salto condicional.

Babbage expuso en 1840, en Turín, su primera y única presentación pública del Ingenio Analítico. Entre los presentes se hallaba Luigi Federico Menabrea (joven matemático que habría de llegar a primer ministro de Italia). Publicó las notas que tomó de la reunión, con anotaciones complementarias de Babbage, en el artículo "Esbozo del Ingenio Analítico", aparecido en francés.

Menabrea centró su atención más en los procesos matemáticos internos del Ingenio de Diferencias y del Ingenio Analítico que en sus operaciones mecánicas subyacentes. Trazó el propósito de los componentes del Ingenio Analítico y reconoció que sería capaz de computar cualquier fórmula algebraica adecuadamente expresada (es decir, programada) en las fichas perforadas. "Las tarjetas", escribió Menabrea, "constituyen una mera traducción de fórmulas algebraicas, o, por expresarlo mejor, son otra forma de notación analítica".

Ada —convertida ya en condesa de Lovelace tras su boda con William King— leyó el trabajo de Menabrea y empezó a traducirlo al inglés. Ada y Babbage seguían manteniendo una buena amistad. Cuando éste se enteró del trabajo de Ada, a primeros de 1843, la animó a comentar la traducción. Esa sugerencia dio comienzo a una importante colaboración, cuyo fruto fue la publicación por Ada de un artículo en el que se examinaba con detenimiento la programación de una máquina computadora; iba a ser el único artículo de tal naturaleza durante los cien años siguientes. Ada incluía un total de siete notas (de la A a la G), cuya extensión conjunta duplica con holgura la del artículo original de Menabrea. Un tema importante era la significación de la capacidad del Ingenio Analí-

Números de Bernoulli

Los números de Bernoulli aparecen en los desarrollos polinómicos de funciones trigonométricas que sirvieron antaño para la construcción de tablas de navegación. Están definidos por la constante B_n en el desarrollo polinómico de la expresión:

$$\frac{x}{e^x - 1} = \sum_{n \geq 0} B_n \frac{x^n}{n!}$$

Para su programa, Ada simplificó la expresión anterior, dejándola en:

$$0 = -\frac{1}{2}\frac{(2x-1)}{(2x+1)} + B_1 \frac{2x}{2!} + B_2 \frac{(2x)(2x-1)(2x-2)}{4!} +$$

$$B_3 \frac{(2x)(2x-1)(2x-2)(2x-3)(2x-4)}{6!} +$$

$$... + B_n \frac{(2x)(2x-1)...(2x-2n+2)}{(2n)!}$$

Para calcular B_n a partir de esta expresión, se empieza haciendo $x = 1$. Obsérvese que la fracción que está junto a B_1 se convierte en 1, y las fracciones que acompañan a B_2, B_3 y sucesivos son todas iguales a 0, porque cada numerador contiene el factor $(2x - 2)$, que es igual a 0 cuando $x = 1$. Resulta así:

$$0 = (-\frac{1}{2} \times \frac{1}{3}) + B_1$$

Por tanto, $B_1 = {}^1/_6$. Ahora, tomando $x = 2$, la fracción que acompaña a B_2 toma el valor 1, porque lo mismo el numerador que el denominador son iguales a 4! $(4 \times 3 \times 2 \times 1)$, y las fracciones que acompañan a B_3, B_4 son todas iguales a 0, porque cada numerador contiene el factor $(2x \times 4)$, que es igual a 0 cuando $x = 2$. La expresión resultante es:

$$0 = (-\frac{1}{2} \times \frac{3}{5}) + (B_1 \times 2) + B_2$$

El valor de B_1 es conocido ya por la sustitución precedente, y se puede ver fácilmente que $B_2 = -{}^1/_{30}$. Los cinco primeros números de Bernoulli son ${}^1/_6$, $-{}^1/_{30}$, ${}^1/_{42}$, $-{}^1/_{30}$ y ${}^5/_{66}$.

Por diversas razones, los índices que Ada utilizó en su programa eran todos números impares: B_1, B_3, B_5 y sucesivos, y no B_1, B_2, B_3... El cómputo de cada uno de los números de Bernoulli, uno por vez, constituía el bucle externo del programa, por utilizar el vocabulario de programación moderno. Para calcular el valor de la fracción que acompaña a cada número de Bernoulli, Ada se valió de un segundo bucle. Empezaba dividiendo el primer factor del numerador por el primer factor del denominador y almacenando ese valor. Después dividía el segundo factor del numerador entre el segundo factor del denominador y multiplicaba el valor resultante por el previamente almacenado. Estos pasos se iteraban hasta concluir el cálculo del valor de la fracción, momento en que era multiplicado por el número de Bernoulli adecuado.

—E.E.K y B.A.T.

El método de Ada para la computación de números de Bernoulli

Se expone aquí el programa de Ada para el cómputo del cuarto número de Bernoulli, B_7. Las seis primera columnas ponen de manifiesto las diversas operaciones que habría de realizar el Ingenio Analítico; las demás columnas representan los valores de cada una de las variables. Cada fila representa una operación.

Al empezar el programa hay seis variables en uso: V_1, V_2, V_3, V_{21}, V_{22} y V_{23} (*véanse los recuadros sombreados*). (Los superíndices del cuadro indican el número de veces que ha sido utilizada la variable.) Los valores de estas variables son 1, 2, n (aquí es 4, porque Ada está calculando B_7, el cuarto número de Bernoulli), B_1, B_3 y B_5. La V_{10} se utiliza para almacenar el número de iteraciones que quedan por realizar. En la primera iteración, V_{10} es igual a $n-1$, en la segunda, V_{10} es igual a $n-2$, y así sucesivamente. Cuando V_{10} es igual a 1, el bucle se detiene; el programa ha terminado de calcular el número de Bernoulli.

Las seis primeras operaciones sirven para calcular $(^1/_2)\times(2n-1)/(2n+1)$ y almacenar el valor en V_{13}. La operación 7 le resta 1 a n y le asigna el resultado a V_{10}, porque la primera iteración ha terminado. Las operaciones 8, 9, y 10 sirven para calcular $2n/2$ y multiplicarlo por B_1, que había sido ya calculado y almacenado en V_{21}; el resultado se almacena en V_{12}. La operación 11 toma V_{12} y se lo suma a V_{13}, y la operación 12 le resta 2 a n y almacena ese valor en V_{10}, porque ha terminado la segunda iteración. En las operaciones 13 a 21 es calculado el valor siguiente y multiplicado por B_5.

Un defecto del programa de Ada es que no utiliza una variable para llevar control de cada iteración mientras calcula los valores fraccionarios, como hace con V_{10} cuando computa el producto de las fracciones por los números de Bernoulli anteriores. Observemos también un desliz en la Operación 21 del programa de Ada, donde el tercer factor del denominador tendría que ser 4, y no 3. —*E.E.K.* y *B.A.T.*

Diagram for the computation by the Engine of the Numbers of Bernoulli. See Note G. (page *722 et seq.*)

Number of Operation.	Nature of Operation.	Variables acted upon.	Variables receiving results.	Indication of change in the value on any Variable.	Statement of Results.	Data. ${}^1V_1$ ○ 0 0 0 1 [1]	Data. ${}^1V_2$ ○ 0 0 0 2	Data. ${}^1V_3$ ○ 0 0 0 4	Working Variables. ${}^0V_4$ ○ 0 0 0 0	Working Variables. ${}^0V_5$ ○ 0 0 0 0	Working Variables. ${}^0V_6$ ○ 0 0 0 0	Working Variables. ${}^0V_7$ ○ 0 0 0 0	Working Variables. ${}^0V_8$ ○ 0 0 0 0	Working Variables. ${}^0V_9$ ○ 0 0 0 0	Working Variables. ${}^0V_{10}$ ○ 0 0 0 0	Working Variables. ${}^0V_{11}$ ○ 0 0 0 0	Working Variables. ${}^0V_{12}$ ○ 0 0 0 0	Working Variables. ${}^0V_{13}$ ○ 0 0 0 0	Result Variables. ${}^1V_{21}$ ○ B_1 in a decimal fraction. [B_1]	Result Variables. ${}^1V_{22}$ ○ B_3 in a decimal fraction. [B_3]	Result Variables. ${}^1V_{23}$ ○ B_5 in a decimal fraction. [B_5]	Result Variables. ${}^0V_{24}$... ○ 0 0 0 [B_7]
1	×	${}^1V_2 \times {}^1V_3$	${}^1V_4, {}^1V_5, {}^1V_6$	${}^1V_2 = {}^1V_2$ ${}^1V_3 = {}^1V_3$	$= 2n$	...	2	n	$2n$	$2n$	$2n$											
2	−	${}^1V_4 - {}^1V_1$	${}^2V_4$	${}^1V_4 = {}^2V_4$ ${}^1V_1 = {}^1V_1$	$= 2n-1$	1	...	...	$2n-1$													
3	+	${}^1V_5 + {}^1V_1$	${}^2V_5$	${}^1V_5 = {}^2V_5$ ${}^1V_1 = {}^1V_1$	$= 2n+1$	1	...	...	...	$2n+1$												
4	÷	${}^2V_5 \div {}^2V_4$	${}^1V_{11}$	${}^2V_5 = {}^0V_5$ ${}^2V_4 = {}^0V_4$	$= \frac{2n-1}{2n+1}$	...	...	...	0	0	...	...	...	...	...	$\frac{2n-1}{2n+1}$						
5	÷	${}^1V_{11} \div {}^1V_2$	${}^2V_{11}$	${}^1V_{11} = {}^2V_{11}$ ${}^1V_2 = {}^1V_2$	$= \frac{1}{2} \cdot \frac{2n-1}{2n+1}$	...	2	...	...	...	...	...	...	...	...	$\frac{1}{2} \cdot \frac{2n-1}{2n+1}$						
6	−	${}^0V_{13} - {}^2V_{11}$	${}^1V_{13}$	${}^2V_{11} = {}^0V_{11}$ ${}^0V_{13} = {}^1V_{13}$	$= -\frac{1}{2} \cdot \frac{2n-1}{2n+1} = A_0$	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	0	....	$-\frac{1}{2} \cdot \frac{2n-1}{2n+1} = A_0$				
7	−	${}^1V_3 - {}^1V_1$	${}^1V_{10}$	${}^1V_3 = {}^1V_3$ ${}^1V_1 = {}^1V_1$	$= n-1\ (=3)$	1	...	n	...	...	...	...	...	...	$n-1$							
8	+	${}^1V_2 + {}^0V_7$	${}^1V_7$	${}^1V_2 = {}^1V_2$ ${}^0V_7 = {}^1V_7$	$= 2+0 = 2$	...	2	...	...	...	...	2										
9	÷	${}^1V_6 \div {}^1V_7$	${}^3V_{11}$	${}^1V_6 = {}^1V_6$ ${}^0V_{11} = {}^3V_{11}$	$= \frac{2n}{2} = A_1$	...	...	...	...	...	$2n$	2	...	...	...	$\frac{2n}{2} = A_1$						
10	×	${}^1V_{21} \times {}^3V_{11}$	${}^1V_{12}$	${}^1V_{21} = {}^1V_{21}$ ${}^3V_{11} = {}^3V_{11}$	$= B_1 \cdot \frac{2n}{2} = B_1 A_1$	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	$\frac{2n}{2} = A_1$	$B_1 \cdot \frac{2n}{2} = B_1 A_1$	....	B_1			
11	+	${}^1V_{12} + {}^1V_{13}$	${}^2V_{13}$	${}^1V_{12} = {}^0V_{12}$ ${}^1V_{13} = {}^2V_{13}$	$= -\frac{1}{2} \cdot \frac{2n-1}{2n+1} + B_1 \cdot \frac{2n}{2}$ ...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	....	0	$\left\{-\frac{1}{2} \cdot \frac{2n-1}{2n+1} + B_1 \cdot \frac{2n}{2}\right\}$				
12	−	${}^1V_{10} - {}^1V_1$	${}^2V_{10}$	${}^1V_{10} = {}^2V_{10}$ ${}^1V_1 = {}^1V_1$	$= n-2\ (=2)$	1	...	...	...	...	...	...	...	...	$n-2$							
13	−	${}^1V_6 - {}^1V_1$	${}^2V_6$	${}^1V_6 = {}^2V_6$ ${}^1V_1 = {}^1V_1$	$= 2n-1$	1	...	...	...	...	$2n-1$											
14	+	${}^1V_1 + {}^1V_7$	${}^2V_7$	${}^1V_1 = {}^1V_1$ ${}^1V_7 = {}^2V_7$	$= 2+1 = 3$	1	...	...	...	...	...	3										
15	÷	${}^2V_6 \div {}^2V_7$	${}^1V_8$	${}^2V_6 = {}^2V_6$ ${}^2V_7 = {}^2V_7$	$= \frac{2n-1}{3}$	...	...	...	...	...	$2n-1$	3	$\frac{2n-1}{3}$									
16	×	${}^1V_8 \times {}^3V_{11}$	${}^4V_{11}$	${}^1V_8 = {}^0V_8$ ${}^3V_{11} = {}^4V_{11}$	$= \frac{2n}{2} \cdot \frac{2n-1}{3}$	...	...	...	...	...	...	...	0	...	...	$\frac{2n}{2} \cdot \frac{2n-1}{3}$						
17	−	${}^2V_6 - {}^1V_1$	${}^3V_6$	${}^2V_6 = {}^3V_6$ ${}^1V_1 = {}^1V_1$	$= 2n-2$	1	...	...	...	...	$2n-2$											
18	+	${}^1V_1 + {}^2V_7$	${}^3V_7$	${}^2V_7 = {}^3V_7$ ${}^1V_1 = {}^1V_1$	$= 3+1 = 4$	1	...	...	...	...	...	4										
19	÷	${}^3V_6 \div {}^3V_7$	${}^1V_9$	${}^3V_6 = {}^3V_6$ ${}^3V_7 = {}^3V_7$	$= \frac{2n-2}{4}$	...	...	...	...	...	$2n-2$	4	...	$\frac{2n-2}{4}$	...	$\left\{\frac{2n}{2} \cdot \frac{2n-1}{3} \cdot \frac{2n-2}{3} = A_3\right\}$						
20	×	${}^1V_9 \times {}^4V_{11}$	${}^5V_{11}$	${}^1V_9 = {}^0V_9$ ${}^4V_{11} = {}^5V_{11}$	$= \frac{2n}{2} \cdot \frac{2n-1}{3} \cdot \frac{2n-2}{4} = A_3$	...	...	...	...	...	...	...	...	0								
21	×	${}^1V_{22} \times {}^5V_{11}$	${}^0V_{12}$	${}^1V_{22} = {}^1V_{22}$ ${}^0V_{12} = {}^2V_{12}$	$= B_3 \cdot \frac{2n}{2} \cdot \frac{2n-1}{3} \cdot \frac{2n-2}{3} = B_3 A_3$	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	0	$B_3 A_3$	....	......	B_3		
22	+	${}^2V_{12} + {}^2V_{13}$	${}^3V_{13}$	${}^2V_{12} = {}^0V_{12}$ ${}^2V_{13} = {}^3V_{13}$	$= A_0 + B_1 A_1 + B_3 A_3$	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	....	0	$\left\{A_3 + B_1 A_1 + B_3 A_3\right\}$				
23	−	${}^2V_{10} - {}^1V_1$	${}^3V_{10}$	${}^2V_{10} = {}^3V_{10}$ ${}^1V_1 = {}^1V_1$	$= n-3\ (=1)$	1	...	...	...	...	...	...	...	...	$n-3$							
Here follows a repetition of Operations thirteen to twenty-three.																						
24	+	${}^4V_{13} + {}^0V_{24}$	${}^1V_{24}$	${}^4V_{13} = {}^0V_{13}$ ${}^0V_{24} = {}^1V_{24}$	$= B_7$	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	....	....	....	......	......	......	B_7
25	+	${}^1V_1 + {}^1V_3$	${}^1V_3$	${}^1V_1 = {}^1V_1$ ${}^1V_3 = {}^1V_3$ ${}^5V_6 = {}^0V_6$ ${}^5V_7 = {}^0V_7$	$= n+1 = 4+1 = 5$ .... by a Variable-card. by a Variable card.	1	...	$n+1$	...	...	0	0										

tico para ser programado mediante las tarjetas perforadas de Jacquard. "La característica distintiva del Ingenio Analítico", escribió Ada, "es la introducción en él del principio ideado por Jacquard para la regulación, mediante tarjetas perforadas, de los motivos complicados en los brocados... Resulta muy adecuado decir que el Ingenio Analítico *teje* pautas algebraicas, al igual que el telar Jacquard teje flores y hojas". Las tarjetas proporcionaban una solución elegante para los tejidos —o para la realización de cálculos— porque permitían la generación automática del motivo —o la ecuación— que se deseara.

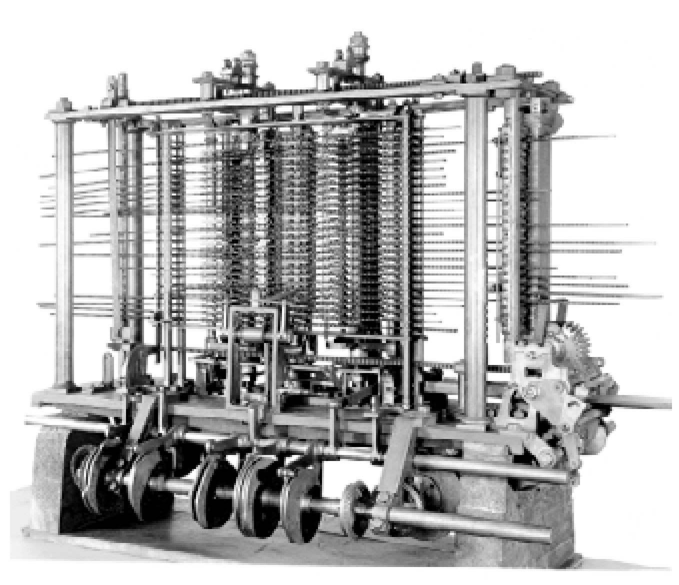
Ada desarrolló por extenso las descripciones de Menabrea. Examinó los detalles menudos de la programación del Ingenio Analítico. Hizo hincapié, por ejemplo, en la importancia computacional de la capacidad del

Ingenio para saltar a distintas instrucciones atendiendo a determinadas condiciones. Y trazó la divisoria entre lo teóricamente posible de computar y lo imposible en la práctica. Ada escribió también sobre las ventajas que ofrecía la capacidad del Ingenio Analítico para utilizar más de una vez un mismo fragmento de codificación. Además, al describir las capacidades de procesamiento simbólico del Ingenio, se refirió a su capacidad para componer música: “Suponiendo, por ejemplo, que las relaciones fundamentales de los sonidos afinados de la ciencia de la armonía y la composición musical fueran susceptibles de tales expresiones y adaptaciones, el Ingenio podría componer piezas musicales científicas y elaboradas, de cualquier grado de complejidad y extensión.”

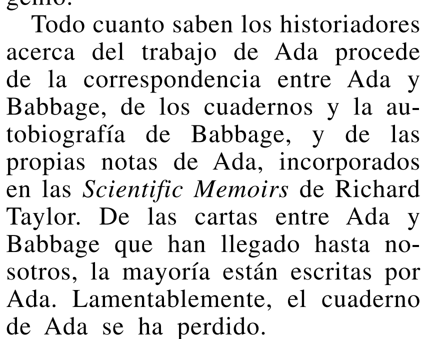
Finalmente, desdeñó la idea de que la máquina “pensara” en la forma en que piensan los humanos. “El Ingenio Analítico no tiene pretensión alguna de *originar* nada”, afirmó. “Puede hacer cualquier cosa que nosotros *sepamos* ordenarle que realice.” Más de cien años después, Alan M. Turing hizo famoso ese juicio en una disertación histórica sobre inteligencia artificial, dándole el nombre de “la objeción de Lady Lovelace”.

El resto de las notas de Ada estaba dedicado a la mecánica de la programación del Ingenio Analítico, sin olvidar una descripción del mecanismo de tarjetas perforadas y de la notación para confeccionar programas. Si, como Menabrea había expresado, y Ada reafirmado, las tarjetas perforadas eran la mera expresión de fórmulas algebraicas, se requeriría una notación rigurosa para expresar las fórmulas en las tarjetas perforadas. Babbage había propuesto un formato tabular para la expresión de programas, que Ada modificó en su publicación.

Nuestra protagonista concluye las notas con su programa para el cómputo de los números de Bernoulli. El matemático suizo Jakob Bernoulli escribió sobre éstos en *Ars conjectandi* (El arte de la conjetura), tratado clásico de probabilidades cuya primera edición es de 1713. El programa de Ada sobre deducción de números de Bernoulli ponía de relieve la capacidad del Ingenio Analítico para efectuar saltos condicionales. Se valía de dos bucles. Era mucho más ambicioso y complejo que cualquiera de los programas que Babbage había escrito para el Ingenio.



2. EL INGENIO ANALITICO DE BABBAGE nunca llegó a ser totalmente construido. Un sector del mismo (*arriba*), correspondiente a parte del molino (CPU) y los dispositivos de impresión, fue ensamblado poco antes de su muerte, ocurrida en 1871. El ingenio hubiera sido programado mediante tarjetas perforadas, idea tomada del telar Jacquard para tejer motivos (*a la derecha*).



Todo cuanto saben los historiadores acerca del trabajo de Ada procede de la correspondencia entre Ada y Babbage, de los cuadernos y la autobiografía de Babbage, y de las propias notas de Ada, incorporados en las *Scientific Memoirs* de Richard Taylor. De las cartas entre Ada y Babbage que han llegado hasta nosotros, la mayoría están escritas por Ada. Lamentablemente, el cuaderno de Ada se ha perdido.

Ada compiló sus notas entre febrero y septiembre de 1843. Durante ese intervalo comunicó frecuentemente a Babbage sus progresos, de viva voz o por carta. Aunque recurría a Babbage para explicar el funcionamiento interno de la máquina y para confirmar la exactitud de sus descripciones, no era raro que lo dejase atónito con su perspicacia agudísima. Por ejemplo, tras leer un borrador de la Nota A, Babbage respondió: “Me siento muy reacio a devolver su admirable & filosófica Nota A. Le suplico que no la altere... Era imposible que usted supiera todo esto por intuición, y cuanto más leo sus notas, más sorprendido me dejan y me hacen lamentar no haber explorado antes tan rica vena del más noble metal.”

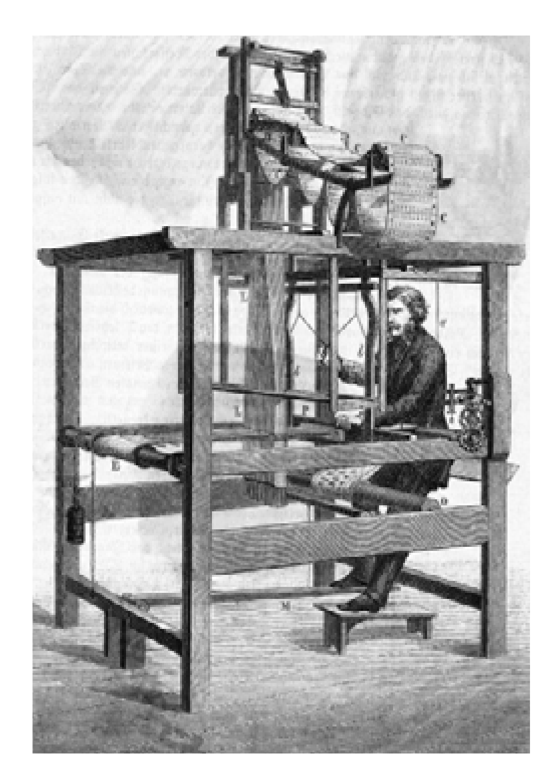
Ada buscaba las opiniones de Babbage y se mostraba receptiva a sus sugerencias sobre contenido; se resistió, sin embargo, a cambiar su redacción. En agosto de 1843, un mes antes de que las pruebas definitivas fueran a imprenta, Babbage trató de insertar un prefacio en las notas de ella, quejándose de la falta de apoyo gubernamental para su Ingenio Analítico. Ada, furiosa, le escribió una carta airada. Al cabo resolvieron sus diferencias, y el prefacio de Babbage apareció de forma anónima e independiente.

En carta a Babbage fechada en julio de 1843, escribía: “Deseo insertar en una de mis Notas algo sobre los números de Bernoulli, a modo de ejemplo de cómo puede calcularse por el Ingenio una función implícita, sin haber sido previamente calculada por la mente & manos humanas. Facilíteme los datos y las fórmulas necesarias.” (Ada había estudiado los números de Bernoulli con De Morgan dos años antes, pero al parecer necesitaba refrescar su recuerdo de la fórmula para generarlos.)

Ante esta epístola, quedan claras dos cosas. La primera, que la idea de incluir un programa que computase números de Bernoulli fue de Ada. Segunda, que Babbage, como mínimo, le facilitó las fórmulas para calcular los números de Bernoulli, hecho que confirmó 21 años después en su autobiografía, *Passages from the Life of a Philosopher*.

No podemos saber de cierto en cuánta medida ayudó Babbage a Ada en la preparación del programa de los

EUGENE ERIC KIM y BETTY ALEXANDRA TOOLE se interesaron por Ada Lovelace mientras preparaban sus tesis de graduación. Kim es redactor técnico en *Dr. Dobbs Journal*, de la ciudad californiana de San Mateo. Se licenció en historia y ciencia por la Universidad de Harvard. Toole se graduó por la de California en Berkeley, donde se especializó en historia de la ciencia y en la integración de la técnica en la educación. Es autora de *Ada, the Enchantress of Numbers: A Selection from the Letters of Lord Byron’s Daughter and Her Description of the First Computer*.



números de Bernoulli. Estaba capacitada para crear el programa dadas las fórmulas adecuadas; no cabe de ello la menor duda, habida cuenta de la profundidad de su comprensión del proceso de programación y de los perfeccionamientos que introdujo en la notación de programación de Babbage. Además, las cartas que Ada y Babbage se cruzaron en la época parecen indicar que las aportaciones del segundo se limitaron a las fórmulas matemáticas y que Ada creó el programa. Enfrascado en éste, le mandó a Babbage: "He estado trabajando incesantemente, & casi siempre con éxito, durante todo el día. Va usted a admirar en extremo la Tabla & Diagrama. Han sido confeccionados con sumo cuidado, & todos los índices, cuidados con suma minucia & escrupulosidad."

No es posible excederse al resaltar la importancia de que Ada optase por redactar este programa. Babbage había escrito varios programas pequeños para su Ingenio Analítico en 1836 y 1837, pero ninguno se acercaba a la complejidad del programa de los números de Bernoulli. Por sus estudios anteriores, estaba familiarizada con las propiedades de esos números. Es posible que se percatase de que un programa para los números de Bernoulli permitiría poner elegantemente de manifiesto algunas de las características esenciales del Ingenio Analítico, como la de salto condicional. Por otra parte, como Menabrea había aludido en su artículo a los números de Bernoulli, el programa de Ada encajaba perfectamente con su traducción de Menabrea.

No podemos terminar nuestro ensayo sin mencionar a Dorothy Stein, autora de *Ada: A Life and a Legacy*, en 1985. Entre las críticas Stein le reprocha la incompetencia en matemática, incapaz por tanto de escribir por sí sola el programa de los números de Bernoulli, idea que repetirán otros biógrafos.

La tesis de Stein se funda en dos datos. Primero, señala un error matemático en la traducción del artículo de Menabrea, vertiendo un error tipográfico francés en un aserto matemáticamente imposible. En el artículo original se leía "le cos. de $n = \infty$", cuando debería decir "le cas de $n = \infty$". La traducción correcta debería rezar "en el caso de $n = \infty$", pero Ada tradujo el aserto literalmente, diciendo "cuando el cos $n = \infty$", lo que es una imposibilidad matemática.

En segundo lugar, Stein cita cartas entre Ada y sus tutores que revelan las dificultades que tenía para realizar la sustitución funcional (demostrar una igualdad por sustitución de una función con su identidad). "La evidencia de la tenuidad con que ella asía la materia de las matemáticas, leemos en Stein, resultaría difícil de atribuir a quien consiguiera adquirir una reputación contemporánea y póstuma de talento matemático, si no hubiera tanto de ello."

Ada había traducido erróneamente una de las proposiciones de Menabrea, pero no es justo atribuir el error a incompetencia matemática. No fue el único error de su artículo; Ada se equivocó incluso al poner sus iniciales en su nota final, abreviando "A.L.L." en vez de "A.A.L." Las 65 páginas de traducciones y anotaciones fueron revisadas por Babbage y otros, quienes también pasaron por alto los errores.

La acusación de Stein de que Ada no comprendía la sustitución funcional es más grave, porque constituye una noción vital en la programación de ordenadores. Es necesario recordar, empero, que el álgebra era la punta de lanza de las matemáticas en la Inglaterra de la época, y que Ada estaba aprendiendo por correspondencia. Reconociendo que sus tutores la estaban ayudando gratuitamente, es más probable que Ada les escribiera sobre las cuestiones que no comprendía que sobre los conceptos que ya había adquirido. El nivel de refinamiento matemático de sus últimas cartas hace ver que, aun cuando Ada pudiera haber tenido dificultades con la sustitución funcional antes de empezar a trabajar en sus notas, lo más probable es que la comprendiera cuando empezó a escribirlas.

La salud de Ada, que no fue buena en ningún momento de su vida, decayó aún más a partir de 1843, limitando su capacidad para el ejercicio de la matemática. Murió el 27 de noviembre de 1852, probablemente de cáncer de útero. A petición suya, fue enterrada al lado de su padre. Su trabajo permaneció en una relativa oscuridad hasta 1953, cuando Bertram V. Bowden compiló *Faster than Thought*, una historia de los ordenadores donde mencionaba el trabajo profético de Ada.

Aunque muchos precursores de la computación moderna acabaron teniendo noticia de los trabajos de Babbage y del artículo de Ada, todos ellos realizaron sus avances conceptuales de forma independiente. A Howard Aiken, de la Universidad de Harvard, que proyectó y construyó el Mark I en 1944, le gustaba considerarse sucesor directo de Babbage. Pero ni estaba familiarizado con el trabajo de Ada, ni alcanzó a comprender la importancia del salto condicional.

Lo que ahora sabemos sobre el diseño y la programación de ordenadores tal vez no se pueda remontar directamente a Babbage y a Ada, pero ellos sí podrían reclamar la precedencia en muchos de estos conceptos. Y Ada, en particular, se ha convertido en un personaje cuya vida y cuyo trabajo todavía avivan la imaginación de muchos científicos informáticos de nuestros días.

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

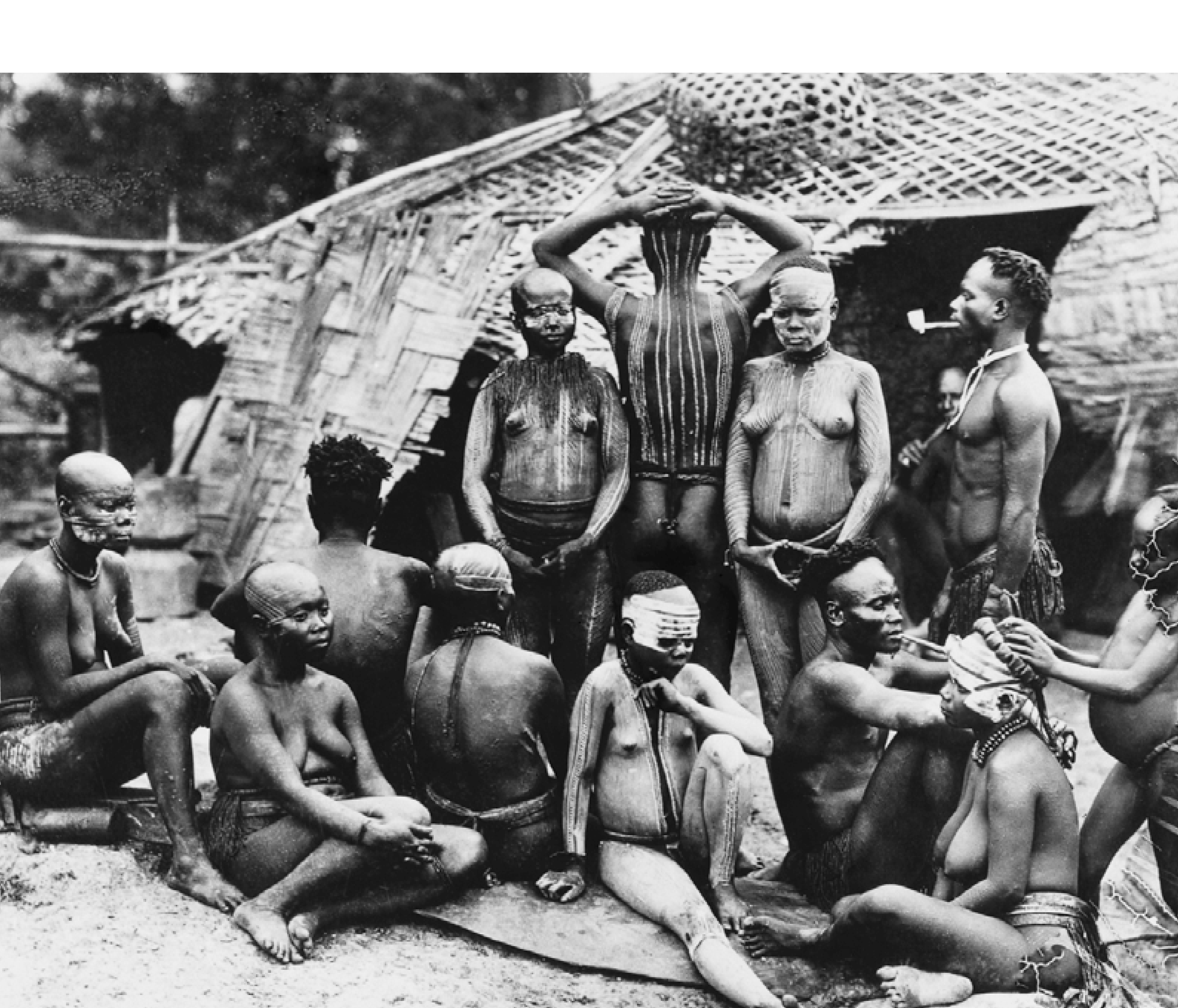
THE MATHEMATICAL WORK OF CHARLES BABBAGE. J. M. Dubbey. Cambridge University Press, 1978.

CHARLES BABBAGE. PIONEER OF THE COMPUTER. Anthony Hyman. Princeton University Press, 1982.

Aborígenes de las islas Andamán

Los nativos de un archipiélago próximo a la India constituyen una estampa viva de los primitivos cazadores-recolectores. Pero, ¿cuánto tiempo permanecerá abierta esa ventana por la que aún podemos asomarnos a nuestro pasado más remoto?

Sita Venkateswar



Los indígenas que habitan las verdes y exuberantes pluviselvas de las islas Andamán, en el golfo de Bengala, han hecho de aquel archipiélago su patria durante 2000 años, por lo menos. A lo largo de los siglos, los isleños andamanes han sido un tema a la vez fascinante y aterrador, describiéndoseles a menudo como feroces caníbales. En el siglo XIII, Marco Polo escribía en el relato de sus viajes que había oído decir que los habitantes de aquellas islas tenían "cabeza de perro". Sir Arthur Conan Doyle imagina en *The Sign of Four* un andamán arquetipo del malvado lleno de "instintos asesinos", cuyo "rostro sería para cualquiera una pesadilla nocturna".

Aparte de tan gratuitos fantaseos, la verdad es que la historia y la cultura de los andamanes siguen intrigando a cuantos visitan sus islas; en especial a los antropólogos. Viven hoy en el archipiélago entre 450 y 500 indígenas, últimos representantes de la declinante población Negrito en Surasia. Los andamanes llevaron el estilo de vida tradicional de estos pueblos —un seminomadismo de cazadores-recolectores-pescadores— hasta bien entrado el siglo XIX, cuando recalaron en sus islas los colonos ingleses y empezaron a dominarles.

Mas, pese a la presencia extranjera, algunos isleños se las han arreglado para conservar sus costumbres tradicionales. Un grupo de ellos permanece todavía en absoluto aislamiento, hostil a los forasteros y decidido a defender hasta la muerte su territorio. Pero la influencia de la ocupación, primero británica y ahora india, se ha dejado sentir. La población de andamanes ha venido cayendo en picado durante los dos últimos siglos, calculándose que a mediados del siglo XIX había en las islas unos 5000 indígenas.

Actualmente sólo quedan cuatro tribus: grandes andamanes, onge, jarawa y centinela. Pero se cree que en otras épocas habitaron las islas 12



1. DECADAS DE COLONIALISMO han acabado con la cultura del pueblo granandamanés, una de las cuatro sociedades indígenas de las islas Andamán, en el golfo de Bengala. Por los años 1890 se comenzó a sentir en este grupo la influencia de la ocupación inglesa. Aunque seguían adornándose tradicionalmente el cuerpo, según se ve en una foto de la época, los isleños habían empezado a conocer no sólo las pipas británicas sino también enfermedades mortales, como la sífilis y la viruela. Sólo quedan unos 40 granandamanes. Una anciana de la comunidad, Boro, a la que vemos (*abajo a la derecha*) en compañía de dos muchachos, está recogiendo el sedal después de una tarde de pesca en la playa.

Las Islas Andaman





POBLACION INDIGENA

	1901	1951	1998
GRANAN-DAMANA	625	23	39
ONGE	672*	150*	100*
JARAWA	468*	50*	250*
CENTINELA	117*	50*	100*

*APROXIMADAMENTE



2. LOS INDIGENAS ANDAMANES forman cuatro tribus: granandamán, jarawa, onge y centinela. Los granandamanes, como lo son estos tres chicos de la foto, se distinguen por tener tres ascendencias: andamán, hindú y karen-birmana. Hoy día este grupo, que originariamente ocupó el Andamán del Norte, del Medio y del Sur, ha sido relegado por el gobierno de la India a la minúscula isla del Estrecho (*véase el mapa*). Los jarawa han permanecido mucho más aislados, aventurándose sólo esporádicamente a salir de las espesas selvas vírgenes del Andamán Medio y del Sur en que viven. Vemos (*página contigua, foto izquierda*) a tres jóvenes jarawa que lucen adornos de cintas y alhajas diversas. Los onge habitan ahora las zonas costeras de la Pequeña Andamán. Esta madre onge y su hijo (*foto del extremo*) siguen la práctica tradicional de pintarse el rostro y el cuerpo con greda blanca. A los miembros de la tribu centinela se los ve raras veces; viven al norte de la isla Centinela y defienden ferozmente su territorio impidiendo cualquier invasión.

grupos lingüísticamente distintos y territorialmente separados. El correr del tiempo está acabando con los postreros representantes de la cultura andamán. Deseosa yo de aprender más sobre los isleños —sobre su pasado, su presente y su futuro— me pasé 18 meses en el archipiélago entre 1989 y 1993, viviendo durante la mayor parte de este tiempo con miembros de la tribu onge.

Los orígenes de los isleños andamanes se hallan envueltos en el misterio. Los datos disponibles —últimamente los de las excavaciones realizadas por Zarine Cooper, del Instituto Deccán de la India— abonan la teoría de una ocupación larga y continua de las islas durante, por lo menos, los últimos 2200 años. Algunos opinan que los ascendientes de los grupos actuales arribaron hace unos 35.000 años. La baja estatura y el característico cabello de los andamanes, junto con su piel oscura, indican que pertenecen a una raza distinta de la que puebla la India continental y distinta también de la población aborigen de las vecinas islas Nicobar.

Lidio Cipriani, que dirigió a comienzos de los años cincuenta en Port Blair la oficina de Estudios Antropológicos de la India, y, más recientemente, Vishvajit Pandya, de la Universidad Victoria de Nueva Zelanda, han defendido que los isleños andamanes podrían estar emparentados con otro grupo Negrito, los Semang del sudeste asiático. Y algunos nuevos, aunque todavía provisionales, datos genéticos parecen indicar que los andamanes podrían descender de los primeros humanos que emigraron de Africa hace unos 100.000 años y que habrían llegado a las islas hace alrededor de 35.000 o 40.000 años.

Se han propuesto dos posibles rutas para la llegada de los andamanes a las islas. Durante las glaciaciones de hace 40.000 años, con un nivel del mar más bajo, aquellas gentes podrían haber atravesado, parte a pie, parte en frágiles canoas, las aguas menos profundas, ya desde Sumatra por las islas Nicobar o bien desde las costas malaya y birmana.

Frente al viejo tópico, los andamanes ni son ni fueron nunca caníbales. El origen probable de este mito es la costumbre que antaño tenían los





isleños de trocear los cadáveres de sus enemigos y arrojar los fragmentos a una hoguera. A los observadores foráneos debía de parecerles tal acción el preámbulo de un festín canibalesco. Pero hoy los antropólogos sabemos que aquella carne nunca era comida; semejante práctica constituía una medida precautoria para dispersar a los espíritus maléficos. No dejan sin enterrar los cadáveres de sus parientes bajo las chozas comunales, para que sus espíritus sigan estando junto a los miembros de la familia vivos.

A menudo se adscribe la cultura de los andamanes a la Edad de Piedra. No es exacto, sin embargo, que vivieran en total aislamiento hasta la llegada de los ingleses. Ya antes de que asomaran por sus islas las potencias colonizadoras cayeron en las redes del tráfico de esclavos extendidas por el sur y el sudeste de Asia. Muchos de los esclavos se le suministraban al rajá de Kedaj, quien los enviaba al rey de Siam como parte de su tributo. Hasta hay algún indicio de haberse llevado esclavos andamanes a los mercados de Francia. Además, como todos los isleños, los andamanes incorporaron siempre a su cultura los variados objetos que el mar arrojaba a sus costas o los que a lo largo de los siglos fueron introduciendo algunos visitantes esporádicos.

Durante mis trabajos de campo en las islas Andamán, pasé la mayor parte del tiempo con la tribu onge. En la Andamán Pequeña viven unos 100 onge en dos asentamientos permanentes: Cala Marsopa, al norte, y Bahía del Sur, en la punta meridional de la isla. El resto de ésta lo habitan inmigrantes de otras etnias, procedentes de la India. Reuniendo datos obtenidos de diversas fuentes —relato de los onge mismos, observaciones mías y averiguaciones hechas antes por Cipriani, por Badal Basu, miembro del Instituto Antropológico de la India, y por Pandya— he logrado hacerme con un abigarrado conjunto de informaciones sobre diversos aspectos del género de vida de los onge y sobre muchas tradiciones típicas de los andamanes.

En mis numerosas entrevistas con unos 30 onge, mujeres, hombres y niños, fueron saliendo a la luz detalles que antes se desconocían sobre su vida en los bosques. Estas conversaciones las mantenía yo en onge; entre las explicaciones más informativas se contaron las de tres hombres, Bada Raju, Totanange y Tilai. Juntando sus noticias he compuesto el siguiente relato:

“Durante la estación seca, ellos [los antepasados u otros *onge*] cogían *bulundange* [un fruto tropical] y lo almacenaban. Llenaban con él *tole* [grandes cestos] que cubrían con hojas, los ataban y los ocultaban en el bosque. Así, cuando viene la gran lluvia, hay comida. También iban a cazar y traían puerco, y cuando éste se acababa comían *bulundange*. Como entonces no había té, sólo bebían agua. Apilaban mucha madera seca, porque cuando llega el tiempo húmedo es muy difícil obtenerla. Por eso es por lo que durante el *Torale* [la estación seca] toda la madera se coge y se almacena. Entonces, antes de que empiece a llover, se construye la gran *tokabe* [choza comunal] y durante las lluvias se está muy cómodo dentro.

”En el pasado no había trabajo a sueldo, teníamos todo el tiempo para construir nuestras casas, cazar cerdo y comerlo bien gordo. Ellos no disponían de utensilios; ellos hacían *bucu* [botes de arcilla]... para cocer la carne de puerco. Al levantarse *Kwalokange* [el viento monzón del sudeste] los verracos adelgazan y no son sabrosos. En las pozas de la selva hay muy buenos peces, nosotros los pescamos, y también *nana* [camarones].

”Como entonces no había hierro, utilizábamos la madera de los árboles de areca [cierta palmera]... pero obteníamos hierro del mar, cuando éste lo arrojaba a las playas. Y usábamos la resina de la selva para aguzar el metal. O, si no, empleábamos la madera de la selva. Hicimos *dange* [piraguas] usando una madera diferente, pero al meterla en el agua se hundió, y así supimos que aquella madera no era buena. Probamos con otra, la metimos en el agua y vimos que sí que flotaba. Esta es la madera que cortamos desde entonces. Así es como fuimos aprendiendo las cosas.

”En los viejos tiempos no había hilo de nailon, el sedal que sirve ahora para matar a las tortugas. Nos metíamos en el agua y empujábamos a la tortuga, encendíamos junto con incienso recogido en la selva unas antorchas de *kuendeve* [hojas de rota secas] y nos apiñábamos en torno a la tortuga. En aquellos tiempos los onge éramos muchos, y podíamos rodear a la tortuga. Nunca arponeábamos entonces a la tortuga, sólo usábamos flechas para cazar jabalíes.

”Y también cazábamos así a la marsopa. Esperábamos a que la marea fuese baja y entonces íbamos a





3. LA VIDA DOMESTICA de algunos habitantes de las islas Andamán refleja costumbres ancestrales; en otros prevalece el mundo moderno. Una mujer onge prepara el arroz (suministrado por el gobierno hindú) para la comida familiar del mediodía en un hogar tradicional situado en Bahía del Sur, isla Andamán Pequeña (*foto de la izquierda*). En isla del Estrecho, Golat, un joven granandamán está en la escuela viendo por la televisión un partido de cricket mientras cuida a dos niños de la comunidad (*derecha*).

cazar la tortuga y la marsopa por la noche. No con la marea alta, pues nos ahogaríamos. Una vez hecho aquello, volvíamos a la selva, cogíamos más incienso, lo quemábamos con las antorchas e íbamos en busca de verracos.

”Los onge éramos entonces muchos y no le teníamos miedo a *Tommanyo* [un espíritu de la noche], y solíamos adentrarnos por la noche en la selva. No teníamos ningún miedo entonces. En aquel tiempo había onges por todas partes, había muchas *bera* [agrupaciones territoriales] por doquier. ¡Eramos tantos entonces! Los jabalíes duermen de noche y entonces era cuando los cazábamos. ¡Resultaba tan fácil entonces! Durante el día volvíamos sobre nuestros pasos buscando las piezas logradas la noche antes, nos las llevábamos a la choza, las desollábamos y las cocinábamos. De esta manera vivíamos. No teníamos entonces vestidos; nos tapábamos con cortezas y hojas de la selva. Las muchachas se hacían vestidos con *kuendeve*. Estas son algunas de las cosas que solíamos hacer.”

SITA VENKATESWAR enseña antropología social en la Universidad Massey de Nueva Zelanda. Se doctoró en la de Rutgers, con una investigación de campo desarrollada en las islas Andamán.

Como muchos otros grupos indígenas, los onge se dan cuenta de que habitan un mundo lleno de interconexiones, poblado de espíritus entre los que se incluyen los de sus ascendientes —los *Onkoboykwo*— que desempeñan un papel activo en la vida cotidiana. Los onge comparten este universo con otros varios espíritus, los *tomya*, de cuya presencia avisan soplando como vientos en distintas direcciones, con lo que marcan cada estación y le dan nombre.

Sobre la comida pivota el ciclo de vida y muerte de los onge. Por ejemplo, la nueva vida es concebida cuando las mujeres comen alimentos en los que residen los *Onkoboykwo*. Estos espíritus de los antepasados, que por lo demás moran en un reino similar al mundo de los onge, no tienen dientes y no pueden masticar comida. De ahí que, para satisfacer su hambre, se introduzcan en varios alimentos. Así, cuando las mujeres comen alimentos que contienen tales espíritus, los *Onkoboykwo* se convierten en onge; tras la muerte, los onge se transforman de nuevo en *Onkoboykwo*. La comida crea también las bases para ciertas interacciones sociales: se forman importantes vínculos entre un niño y todas las mujeres que criaron y cuidaron al infante, así como entre el niño y el hombre o la mujer que proporcionaron los alimentos que fecundaron a su madre.

Esta descripción pone de manifiesto la profunda y simbólica significación que tienen para los onge los alimentos que consumen —significación que reflejan sus hábitos cazadores y recolectores, amén de sus relaciones con el entorno. Es muy fuerte su conexión con la naturaleza, que dicta dónde han de vivir las tribus onge durante el año y lo que han de comer. Por ejemplo, al principio de la estación seca y caliente (que suele ser en marzo y abril), las familias onge se trasladan desde el litoral, donde habían estado cazando tortugas, hacia el interior de la selva para colectar *tanja*, miel. Este cambio de lugar marca el comienzo de la estación de *Torale*, en la que los espíritus dejan libres las islas. Las familias de una misma *bera* se reúnen en la gran choza comunal de forma de colmena en cuyo suelo están enterrados los huesos de los ancestros.

La llegada del espíritu *Dare* a la selva, cabalgando a lomos del mon-



zón del sudeste (normalmente en junio), señala el fin del *Torale* y el tiempo de salir de la selva e ir a los abrigos de alrededor de las calas y a los manglares. Aquí los onge pueden pescar cangrejos y peces y coger mangle. Cuando el espíritu *Dare* se va, en septiembre, los onge vuelven a la selva y se atiborran de jabalí hasta que se acerca el espíritu *Kwalokange* y llega, en octubre, el monzón del sudeste. Por esa época, los onge se dirigen a la costa para la caza de la marsopa. Creen que el espíritu *Kwalokange* consume los jabalíes que quedan en la selva, dejando sólo unos pocos para el siguiente espíritu, *Mekange*, el viento del nordeste. La aparición de *Mekange*, de noviembre a febrero, indica que los onge han de reanudar la caza de tortugas. Se ha completado así el ciclo de las estaciones.

Todo lo que de las costumbres y creencias de los onge acabo de describir nos remite a su modo de vida tradicional, común en gran parte a los otros pueblos de las islas. Pero esta cultura tradicional va declinando desde hace aproximadamente siglo y medio, desde que los colonos empezaron a imponer su ley.

En 1858, el gobierno británico estableció en las islas Andamán un régimen de colonia penal permanente. Se redactaron entonces las primeras descripciones del archipiélago con cierta fidelidad. Empezaba una ininterrumpida historia de colonización. Cuando llegaron los primeros colonos ingleses, los indígenas poblaban más de las cerca de 200 islas de que consta el archipiélago. El contacto con los británicos produjo la supuesta pacificación de varios grupos de la tribu de los grandes andamanes, así como la de algunas poblaciones costeras de la de los onge.

Claro está que lo de ‘pacificación’ es un abuso terminológico; con esa palabra los militares se referían a la silenciación, frecuentemente violenta, de la resistencia que les oponían las poblaciones locales. Como Carmel Schrire, de la Universidad de Rutgers, ha escrito en su libro *Digging through Darkness: Chronicles of an Archeologist*, “si las opiniones y los sentimientos de los desposeídos” raras veces llegaron a conocerse, “no es porque ellos callaran... sino simplemente porque sus protestas no fueron inscritas en ningún registro”. El resultado es que la mayor parte de lo que sabemos hoy sobre los enfrentamientos de aquella época procede de los informes que redactaron los colonos.

La arribada de los británicos causó, primero, derramamientos de sangre y, después, enfermedades y arrebatamiento de sus bienes a todas las poblaciones del norte, del centro y del sur de las islas Andamán. En 1901, al hacer los ingleses el primer censo en el subcontinente indio, los funcionarios contaron 625 granandamanes, y para las otras tres tribus calcularon los siguientes números: 672 onge, 468 jarawa y 117 centinela. Tras una breve ocupación japonesa de las Andamán durante la Segunda Guerra Mundial, la India se hizo con el control de la región en 1947.

El gobierno indio continuó sobre pautas coloniales, al menos en lo tocante a los isleños andamanes. El cambio del régimen inglés al hindú se redujo a una transmisión de poderes, con poca diferencia entre ellos. El gobierno hindú, como su predecesor, intentó asumir “la responsabilidad del hombre blanco” de ayudar a las poblaciones nativas. Pero las enfermedades y otros factores siguieron cobrándose su tributo. Para 1951, cuando la India independiente hizo su primer censo, el número de granandamanes había disminuido hasta ser sólo 23. Las cifras para las otras tribus fueron también bajas: 150 onge, 50 jarawa y 50 centinela.

Hoy día, de los 40 individuos que pueden atribuirse ascendencia granandamanesa bastantes tienen también reciente ascendencia hindú. Y se calcula que viven unos 100 onge, 250 jarawa y 50 centinela. Los estragos del más antiguo y más duradero contacto los han sufrido los granandamanes, a los que se ha vuelto a establecer en la pequeña isla del Estrecho; el gobierno hindú lo ha dispuesto así como medida de reparación por las históricas injusticias de que fueron objeto estas gentes.

Granandamanes y onge llevan una vida sedentaria. En sustitución de la caza y la pesca el gobierno indio les reparte lotes de víveres. Los jarawa y los centinela han sobrevivido a la era colonial mejor que los otros grupos. La tribu jarawa, que vive en la espesura de la selva, apenas si establece contactos con las otras, y todo contacto que con ella se tenga ha de ser en sus propios términos y cuando sus miembros quieren tolerarlo. Los miembros de la tribu centinela (nom-





4. LA VIVIENDA ONGE tradicional (*arriba*) en Cala Marsopa, de la isla Andamán Pequeña, es más popular entre algunos residentes del pueblo que no las casas de madera que el gobierno les ha construido. En cambio, los granandamanes viven en casas edificadas por el gobierno, como la de Boro, en isla del Estrecho (*foto de abajo*).



5. UNOS *JARAWA* corren al encuentro de un bote que envía el gobierno para visitar a los aborígenes y darles cocos, bananas, arroz, piezas metálicas y telas de color rojo. A comienzos de siglo los antropólogos empezaron a ofrecer a los jarawa telas rojas y se les han seguido entregando hasta hoy.

bre de la isla que habitan) raras veces, si alguna, ven forasteros.

Ambas tribus —sobre todo la centinela— defienden sus límites territoriales con arcos y flechas, reforzadas hoy con la punta de acero. Los funcionarios hindúes, en su pretensión declarada de incluir a los jarawa entre los "ciudadanos de pleno derecho" de la zona, están procurando atraerlos hacia tratos e intercambios más pacíficos ofreciéndoles cocos, bananas, arroz, vestidos y piezas de hierro.

Para Romulus Whitaker, el peligro más grave que amenaza hoy a los jarawa es la creciente invasión de intrusos en sus territorios de caza y pesca. Observa que los jarawa, con el fin de conseguir metales para las puntas de sus flechas, están dispuestos a correr considerables riesgos, como son los de asaltar los campamentos de los constructores de carreteras, los de leñadores y las alquerías. A juzgar por la frecuencia y la intensidad de los "incidentes con jarawa" (que reciben media atención tan sólo si hay muertes del lado hindú), los colonizadores, los intrusos ilegales y la policía diríase que han emprendido una miniguerra contra los jarawa sin aprobación formal del gobierno.

En cambio, los centinela disfrutan de cierto grado de seguridad gracias a que la islita donde viven dista bastante de las otras del archipiélago y es difícil acceder a ella. Siguen presentando un frente hostil contra el mundo exterior. Hasta hace ocho años, lograban que fracasase cualquier intento de aproximación a su insular dominio. Sin embargo, en 1991 aceptaron algunos cocos que les ofreció un equipo de antropólogos y funcionarios. No ha habido más progresos desde entonces. De lo poco que ha podido ser observado, cabe inferir que la forma de vida y la cultura material de este pueblo son muy similares a las de los otros grupos de las islas Andamán.

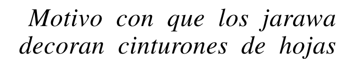
De un tiempo a esta parte se ha impuesto el término "etnocidio" para designar la destrucción perpetrada contra muchas culturas indígenas. No se infiere ya un daño directo a los individuos, pero a menudo se les confina en reservas donde acaban dependiendo por completo de una mayoría dominante que se ha apoderado de sus tierras, dejando al grupo sin ningún medio de supervivencia propio. El pueblo dominante procede luego a mejorar la condición de estos "primitivos" destruyendo todos los elementos de su "atrasado" modo de vivir, con lo cual se da muerte a una cultura distinta.

Aunque diríase que tales políticas responden a un afán humanitario, reflejan un prejuicio, el de suponer que el género de vida de los indígenas es intrínsecamente inferior y, por tanto, urge sustituirlo por otro distinto y mejor. Además, estas políticas dan por supuesto que los pueblos indígenas son incapaces de imaginar o planificar su propio futuro; los foráneos se sienten en el deber de ayudarles a progresar.

Pero lo cierto es que la asimilación de los isleños a la corriente cultural hindú ha beneficiado sobre todo a los colonizadores. A medida que los británicos fueron ampliando su colonia por el norte, el medio y el sur de las islas Andamán y se desarrollaron planes para sacarle mayor rendimiento comercial a la tierra ocupada por los granandamanes (mediante talas, implantación de cultivos y clareo de bosques para construir carreteras), la política gubernamental se fue inclinando hacia un confinamiento obligado de los indígenas en restringidos asentamientos. E independizada ya la India del poder británico, las selvas de la isla Andamán Menor, donde viven los onge, también se han convertido en el blanco de los tiros desarrollísticos.

Por desgracia, sin que importe cómo se amañen las políticas, las consecuencias para los andamanes son una rápida mengua de su territorio, la gradual destrucción de su única y viable forma de vida, y el que acaben ingresando en las cada vez más numerosas filas de otros desposeídos y marginados de la sociedad de la India continental. Como advierte David Maybury-Lewis, de Supervivencia Cultural, "el territorio y la lucha por él constituyen el centro del problema de la supervivencia de una cultura, pues lo que más necesitan los miembros de la tribu es tener garantizada la posesión de sus tierras".

En el orden internacional habría que atender las reclamaciones que de sus territorios hacen los pueblos indígenas y deberían proponerse alternativas para resolver esas disputas. Pasará algún tiempo antes de que los indígenas andamanes adquieran poder para reclamar sus propios derechos. Para que su cultura sobreviva hay que dejar que los andamanes sean los dueños de su propio futuro.



Motivo con que los jarawa decoran cinturones de hojas

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

THE ANDAMAN ISLANDERS. Alfred R. Radcliffe-Brown. Cambridge University Press, 1922. Reedición 1970.

ABOVE THE FOREST: A STUDY OF ANDAMANESE ETHNOANEMOLOGY, COSMOLOGY, AND THE POWER OF RITUAL. Vishvajit Pandya. Oxford University Press, Nueva York y Delhi, 1993.

POLICING POWER, GOVERNING GENDER AND REIMAGINING RESISTANCE: A PERSPECTIVE ON THE CONTEMPORARY SITUATION OF THE ANDAMAN ISLANDERS. Sita Venkateswar. Ph.D. dissertation, Department of Anthropology, Rutgers University, 1997.

Juegos infinitos y conjuntos grandes

Relaciones insospechadas entre los juegos, los sistemas informáticos y la teoría axiomática de conjuntos implican a los cardinales grandes

Jean-Paul Delahaye

El juego comienza con veinte fichas; cada uno de los dos jugadores va retirando, por turno, una, dos, tres o cuatro fichas: quien toma la última gana. ¿Cuál será la mejor manera de jugar? La estrategia victoriosa consiste en ir dejando al adversario un número de fichas que sea múltiplo de 5. Como el jugador que abre la partida tiene ante sí un número de piezas de estas características, perderá si el segundo actúa correctamente, esto es, si se atiene a la estrategia indicada.

En un juego así, "finito, de información completa, sin empates", existe siempre una "estrategia ganadora", es decir, existe un procedimiento de juego que garantiza la victoria a uno de los jugadores, haga el otro lo que hiciere. En el caso precedente tal estrategia resulta fácil de establecer y de aplicar. También resulta interesante saber que siempre existe una estrategia de este tipo, lo que debe animarnos a buscarla.

En el caso de juegos "finitos, de información completa, con empates", como el ajedrez o las damas (pero no el bridge o el póquer, porque no sabemos las cartas que tienen los otros), o bien existe una estrategia ganadora para uno de los jugadores o bien ambos tienen la certeza de poder hacer tablas en todas las partidas (si jugasen bien, todas las partidas acabarían en tablas). En el caso del ajedrez o de las damas, tales estrategias son demasiado complejas para poderse calcular en la práctica; empero, existen. Si se llegase a explicitarlas algún día, ello entrañaría la muerte de tales juegos con más certeza que si un ordenador llegase a campeón del mundo.

Hemos examinado juegos bipersonales finitos, en los que el número de partidas posibles es inmenso: en el caso del ajedrez es superior al número de electrones que contiene el universo visible. Por paradójico que parezca, la complejidad de estas estrategias óptimas finitas es superior a la de las estrategias óptimas de ciertos juegos infinitos, tipo de juegos que constituye el núcleo de los progresos recientes de la teoría de conjuntos.

Tomemos un conjunto A de números reales, comprendido cada uno de ellos entre 0 y 1. Sea, por ejemplo, $A = \{0, 1, 1/2, 1/4, 1/8, ...\}$. El jugador I elige una cifra, '0' o '1'; imaginemos que sea un '1' y que este jugador inicie el desarrollo binario del número real 0,1. El jugador II opta por una de las cifras '0' o '1' —supongamos que sea '0'— y la yuxtapone a las cifras precedentes, lo que produce: 0,10. Y así sucesivamente.

El objetivo del jugador I es que el número obtenido al final de la partida (al cabo de un tiempo infinito) sea un elemento del conjunto A, mientras que el jugador II se propone que este número no sea un elemento de A. ¿Tienen I o II alguna forma de jugar que les asegure la victoria?

Solución: es el jugador II quien dispone de una estrategia ganadora. Empieza jugando '1'; luego elige '1' una vez de cada dos y '0' una de cada dos. Veamos por qué gana de este modo. Hay una pequeña dificultad inicial, pero no será un gran obstáculo: el número 1/2 admite dos desarrollos binarios, a saber, 0,1000... y 0,01111... (el segundo se debe a que la suma de la serie 1/4 + 1/8 + 1/16 + 1/32 + ... es igual a 1/2). Análogamente, los desarrollos binarios de 1/4 son 0,01000... y 0,0011111... En ninguno de estos desarrollos encontramos un '1' al que más adelante siga un '0' y, más adelante todavía, otro '1'; por tanto, a partir de su tercer turno, el jugador II está seguro de que el desarrollo obtenido en el infinito será el de un número no perteneciente a A.

Citemos algunos problemas de juegos infinitos con conjuntos A.

• $A = [1/8, 7/8]$, esto es, el intervalo cerrado formado por todos los números reales comprendidos entre 1/8 y 7/8, incluidos éstos.

Solución: El jugador I posee una estrategia ganadora, a saber: jugar '1' y luego '0', pues todo número de la forma 0,1?0??? ... está comprendido entre 1/2 y 1/2 + 1/4 + 1/8 = 7/8.

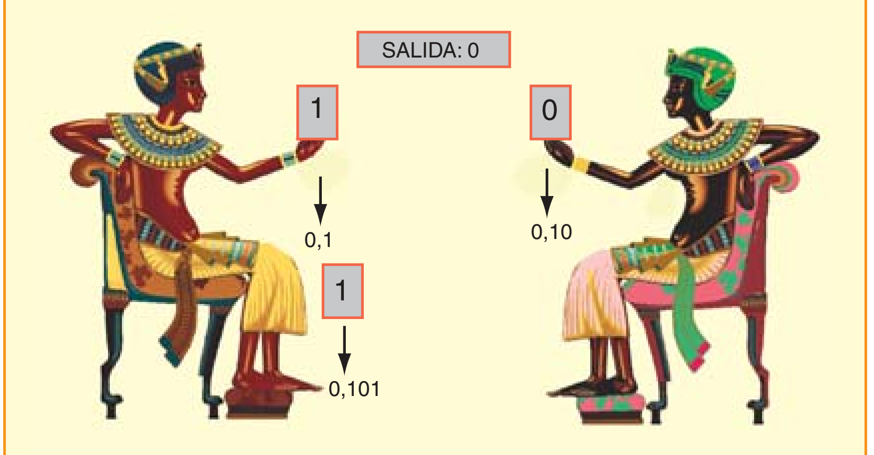
• $A = \{r_1, r_2, ..., r_n\}$, un conjunto finito cualquiera de números reales.

Solución: El jugador II posee una estrategia ganadora. Consiste en fijarse en un dígito de r_1 que tenga posición impar y jugar su complementario cuando llegue a él, lo que "impide" que el resultado final sea r_1 (si r_1 admite dos desarrollos, el jugador II "impedirá" primero uno y luego el otro). El jugador II impide de igual modo la formación de r_2, luego la de r_3, etc. Puesto que dispone de un número infinito de turnos, el jugador II puede impedir por orden

JEAN-PAUL DELAHAYE es profesor de informática en la Universidad de Lille.

1. EL JUEGO DE LOS FARAONES

El conjunto *A* contiene todos los números positivos menores que 1 cuyo desarrollo binario no contenga jamás tres ceros o tres unos consecutivos. El conjunto *A* contiene, por ejemplo, a 2/3 = 0,10101010... y a 6/7 = 0,110110110...



El primer faraón elige una de las cifras 0 o 1 y comienza a componer el desarrollo binario, por ejemplo: 0,1. El segundo faraón elige a su vez o bien un 0, o bien un 1, y lo yuxtapone: 0,10. Y así sucesivamente.
El objetivo del primer faraón es que el número obtenido al final de la partida infinita sea un elemento del conjunto *A*. El segundo faraón se propone que tal número no pertenezca al conjunto *A*. En este caso el primer faraón gana siempre, si opta por jugar cada vez lo contrario de lo que haya hecho el otro en su último turno.
Se dice que el conjunto *A* es determinado cuando existe una estrategia que garantiza la victoria de uno de los dos jugadores. La afirmación de que todo conjunto es determinado constituye un enunciado indecidible de la teoría de conjuntos.

la formación de cada uno de los elementos de *A* y tiene la certeza de ganar. Señalemos que este “método de prevención” se adapta a todo conjunto infinito numerable *A*. (Se dice que un conjunto es numerable cuando podemos indicar todos sus elementos con números enteros.)

• *A* = los números cuyo desarrollo binario no contiene jamás tres ‘0’ o tres ‘1’ consecutivos (juego de los faraones del recuadro 1).

Solución: El jugador I gana actuando arbitrariamente en su primer turno y jugando siempre después lo contrario de lo que haga el jugador II (lo cual garantiza que jamás haya tres cifras consecutivas idénticas y, por tanto, que el número obtenido en el infinito se encuentra en *A*).

Podríamos multiplicar los ejemplos y descubriríamos que, para cualquier conjunto *A* que no sea demasiado complicado, uno de los jugadores dispone de una estrategia ganadora. Cuando así ocurre, se dice que el juego correspondiente al conjunto *A* está *determinado* o bien que el conjunto *A* es *determinado*.

Los matemáticos polacos S. Mazur y S. Banach analizaron, allá por los años treinta, los juegos infinitos y sus estrategias ganadoras. Tales desarrollos poseen interés actual para los informáticos, pues gracias a ellos se modelizan las interacciones entre un sistema informático y sus usuarios. Los informáticos quieren garantizar que el sistema computarizado no se averíe jamás y que responda a la demandas de los usuarios en lo que concierne al acceso a los recursos que tiene a su cargo (impresora, módem...). El sistema informático juega, pues, una especie de partida infinita con sus usuarios, los cuales, por torpeza o por mala voluntad, podrían interrumpir su funcionamiento. Por otra parte, los usuarios no han de tener que esperar indefinidamente el acceso a los recursos que solicitan.

La existencia de una estrategia ganadora para el sistema garantiza que jamás se producirán averías y que los usuarios serán correctamente servidos, mientras que si quienes disponen de ella son los usuarios hay un punto vulnerable en la seguridad. Los problemas de juegos infinitos son problemas concretos; sin embargo, nos conducirán a los confines de la teoría de conjuntos, a un lugar en el que los objetos considerados son tan grandes, tan “infinitos”, que su existencia es indecidible.

Una vez especificado el contenido del conjunto *A*, ¿existe una estrategia ganadora para uno de los jugadores? Dicho con otras palabras, ¿pertenece todo conjunto *A* a la clase de los conjuntos determinados? Si la respuesta fuese negativa, ¿cuáles son los conjuntos determinados?

No obstante la sencillez de su formulación, son insospechadas la profundidad y la dificultad de estas preguntas; en nuestros días no es posible darles plena respuesta, porque están ligadas a los aspectos más misteriosos de la teoría axiomática de conjuntos y, en especial, a los axiomas de los cardinales grandes y a la hipótesis del continuo.

Los primeros resultados, debidos a D. Gale y F. Stewart, llevan fecha de 1953. Estos dos matemáticos demostraron que todo conjunto abierto es un conjunto determinado. Los dos adversarios juegan como antes, añadiendo cada uno, en su turno, ora un ‘0’, ora un ‘1’. En el caso de ciertos conjuntos abiertos, como el intervalo *A* igual a]0, 2/3[(todos los números comprendidos entre 0 y 2/3, sin incluir ni 0 ni 2/3), es el jugador I quien dispone de la estrategia ganadora; en otros, como el *A* =]1, 4/3[, es el jugador II quien tiene garantizada la victoria.

Gale y Stewart demostraron también que no se debe creer que todo conjunto sea determinado: tal supuesto entraría en contradicción con un axioma básico de la teoría de conjuntos, el llamado “axioma de elección”. Este axioma afirma una perogrullada: si tenemos una familia de conjuntos no vacíos, podemos construir un conjunto nuevo eligiendo un elemento de cada uno de los conjuntos de la familia. El axioma de elección suscitó un intenso debate a principios de siglo, pero en la actualidad es aceptado por los especialistas en teoría de conjuntos.

Se consideró por un momento la posibilidad de adoptar el axioma de determinación completa, que afirmaría que “todo conjunto es determinado”, y renunciar al axioma de elección. Por analogía con el caso finito, resulta natural mantener que todo conjunto es determinado, es decir, que para todo conjunto *A* existe una estrategia ganadora. J. Mycielsky y H. Steinhaus razonaban del siguiente modo en 1962: “Supongamos que los dos jugadores sean infinitamente inteligentes y que ambos conozcan perfec-

tamente bien el conjunto *A*. En tal caso el resultado del juego no puede depender del azar y, por consiguiente, uno de los dos ha de disponer de una estrategia ganadora.”

Entre dos enunciados “naturales” que se contradicen, que son en este caso el axioma de determinación completa y el axioma de elección, podemos conservar el que más nos “convenga”, que sería el axioma de determinación completa si tenemos interés en él.

Esta defensa del axioma de determinación completa se juzga hoy poco convincente y los matemáticos prefieren conservar el axioma de elección, mejor anclado en la intuición.

Interesémonos por los subconjuntos de los números reales *R* y tratemos de identificar los que resulte razonable considerar determinados. Simplificando, los subconjuntos de *R* se agrupan en cuatro categorías: abiertos, borelianos, proyectivos y no proyectivos.

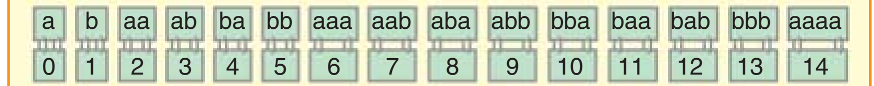
Se invirtieron veinte años de trabajo en generalizar la demostración de que “todo conjunto abierto es un conjunto determinado” hasta probar que “todo conjunto boreliano es determinado”; la demostración quedó concluida en 1975 gracias a Donald Martin. La etapa siguiente hubiera consistido en demostrar que todo conjunto proyectivo es determinado, afirmación que constituye la llamada *determinación proyectiva*, pero nunca se llegó a la meta. La demostración era imposible, como se vio al probar que los axiomas habituales de la teoría de conjuntos, si son consistentes, no demostrarán jamás la determinación proyectiva.

En consecuencia, hay ciertos conjuntos respecto de los que resulta imposible saber si el juego asociado posee estrategia ganadora. El resultado es asombroso, pero el axioma de determinación proyectiva resultaba tan tentador, que no se deseaba abandonarlo; permite una teoría elegante y eficaz de los subconjuntos de *R*.

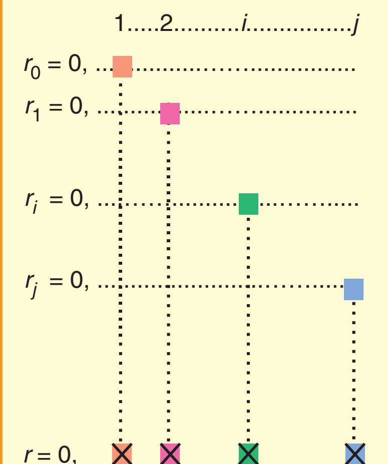
Con el axioma de determinación completa ciertas demostraciones son más directas y más naturales que otras demostraciones conocidas. Citemos a Martin: “A pesar de que no pueda demostrarse la determinación proyectiva desde los axiomas habituales de la teoría de conjuntos, sí conduce a una teoría elegante y esencialmente completa de los conjuntos proyectivos y, por consiguiente, no es irracional que sea verdadera. El

2. CONJUNTOS NUMERABLES. HIPOTESIS DEL CONTINUO

Se dice que un conjunto infinito es numerable si es posible ponerlo en correspondencia biunívoca, elemento a elemento, con el conjunto de los números enteros. Así, por ejemplo, el conjunto *N* de todas las palabras que se pueden escribir con las dos letras "a" y "b" es numerable:



En cambio, el conjunto de los números reales, denotado *R*, no es un conjunto numerable. Ello se demuestra mediante el razonamiento diagonal de Cantor:



Supongamos que r_0, r_1, r_2,...,r_i, ..., r_j, ... fuese una lista completa de todos los números reales. Se podría construir entonces un número real *r* cuya *i*-ésima cifra decimal fuese distinta de la *i*-ésima cifra decimal de r_i. El número real así construido no es igual a ninguno de los números de la lista r_0, r_1, r_2,...,r_i, ..., r_j, ... La lista inicial no es, por consiguiente, exhaustiva y el conjunto de los números reales no es numerable. Un conjunto que pueda ponerse en correspondencia biunívoca, elemento a elemento, con el conjunto de los números reales se dice que tiene la potencia del continuo.

La hipótesis del continuo afirma que todo subconjunto infinito de *R* es numerable o tiene la potencia del continuo.

3. CONJUNTOS CERRADOS, ABIERTOS, BORELIANOS, PROYECTIVOS

CONJUNTOS CERRADOS

El intervalo cerrado *[a, b]* es el conjunto de todos los puntos *x* que verifican *a < x < b*. (Los extremos *a* y *b* forman parte de *[a, b]*).

[a x b]
CONJUNTO CERRADO

]a x b[
CONJUNTO ABIERTO

CONJUNTOS ABIERTOS

El intervalo abierto *]a, b[* es el conjunto de todos los puntos *x* que verifican *a < x < b*. (Los extremos *a* y *b* no forman parte de *]a, b[*.)
Un conjunto *A* es abierto si cada punto de *A* puede ser rodeado por un intervalo abierto contenido en *A*: ningún punto de *A* se encuentra en el borde. La intersección de la familia numerable de intervalos abiertos]1/3 – 1/*n*, 2/3 + 1/*n*[es el intervalo cerrado [1/3, 2/3]. La unión de la familia numerable de intervalos cerrados [1/*n*, 1 – 1/*n*] es el intervalo abierto]0, 1[.

]1/3-1/3, 2/3+1/3[
]1/3-1/4, 2/3+1/4[
]1/3-1/5, 2/3+1/5[
[1/3, 2/3]
INTERSECCION NUMERABLE

[1/3, 1-1/3]
[1/4, 1-1/4]
[1/5, 1-1/5]
]0,1[
UNION NUMERABLE

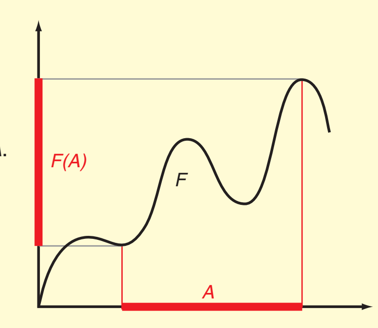
CONJUNTOS BORELIANOS

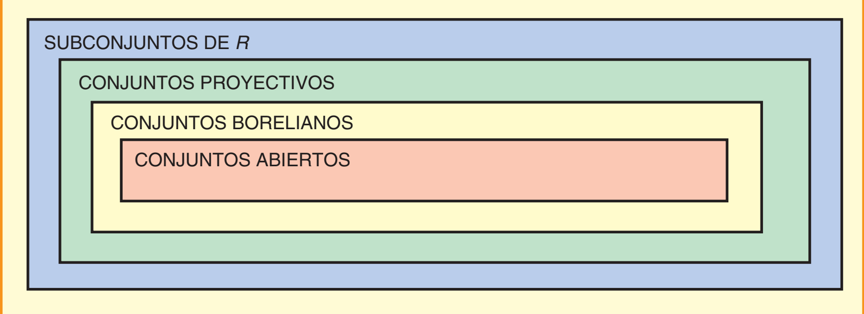
Se dice que un subconjunto de *R* es boreliano (en recuerdo de Emile Borel, 1871-1956) si puede obtenerse a partir de intervalos abiertos, efectuando una o varias veces (en número finito) operaciones de unión o de intersección numerables. Así, por ejemplo, la unión de todos los vértices de todas las curvas de von Koch, que en el infinito da lugar a un conjunto fractal, es un conjunto boreliano que no es ni abierto ni cerrado. Una gran mayoría de los subconjuntos de *R* que se estudian en matemáticas elementales son conjuntos borelianos. La hipótesis del continuo es verdadera para los conjuntos borelianos: todo subconjunto boreliano infinito de *R* o bien es numerable o tiene la potencia del continuo.

CONJUNTO BORELIANO

CONJUNTOS PROYECTIVOS

Sea *F* una función continua. La imagen o proyección del conjunto *A* por la función *F* es el conjunto de los puntos *F*(*a*) correspondientes a todos los puntos del conjunto *A*. Un subconjunto de *R* es proyectivo si puede construirse a partir de un conjunto boreliano mediante las operaciones de paso al complementario y de proyección de aplicaciones continuas. Existen subconjuntos de *R* que no son proyectivos.





axioma de determinación completa posee un estatuto análogo al de una hipótesis física: las consecuencias de la determinación proyectiva son tan armoniosas y ricas que constituyen una demostración casi empírica de la determinación proyectiva.” Resultaba, pues, natural añadir el axioma de determinación proyectiva a los demás axiomas de la teoría de conjuntos de Zermelo-Fraenkel con axioma de elección, denotada ZFC.

Observemos lo curioso de la situación. Los matemáticos, que no consiguen demostrar una propiedad —y saben incluso que no es demostrable con los instrumentos habituales— pero aprecian sus consecuencias gratas, proponen considerarla verdadera, cuando lo normal es que no propongan sino axiomas verdaderos *a priori* (evidentes por sí mismos); en este caso es *a posteriori* (tras el estudio de sus consecuencias) como juzgan que la determinación proyectiva es verdadera y desean tomarla como axioma.

Una de las consecuencias favorables de la inserción de este nuevo axioma en la teoría de conjuntos es que permite tratar parcialmente la hipótesis del continuo. Para explicar esto y para hacer ver el interés de la investigación de nuevos axiomas, hemos de volver sobre la hipótesis del continuo.

La hipótesis del continuo —propuesta por Cantor en 1878— afirma que en el conjunto *R* de los números reales existen solamente dos tipos de subconjuntos: los que se pueden poner en correspondencia elemento a elemento con los números enteros y los que se pueden poner en correspondencia biunívoca con los números reales.

Kurt Gödel y Paul Cohen demostraron que esta afirmación general es independiente de los otros axiomas de la teoría de conjuntos, puesto que no se introducen contradicciones si se añade la hipótesis del continuo a los otros axiomas de ZFC, como demostró Gödel, ni si se añade su negación, como demostró Cohen. Se sabe también que la hipótesis del continuo no tiene consecuencia alguna en la aritmética; es decir, todo cuanto sobre números enteros se pueda demostrar utilizando la hipótesis del continuo es también demostrable sin ella.

A veces se malinterpretan los resultados de Gödel y Cohen. Hay quienes deducen de esta independencia que el matemático puede, según sus gustos, añadir la hipótesis

del continuo o su negación a los axiomas habituales de la teoría de conjuntos. Esto sólo es válido si se considera que tras los conjuntos no hay ninguna realidad y que las matemáticas consisten solamente en manipulaciones simbólicas desprovistas de sentido, lo que corresponde a la posición formalista en filosofía de las matemáticas (posición sostenida por el propio Cohen). Si, por el contrario, se piensa, en línea con Gödel, que existe un mundo de conjuntos y que nuestro propósito debe ser comprender su realidad y construir su teoría, como se haría en física, el resultado de la independencia de la hipótesis del continuo no significa que se tenga libertad para elegir arbitrariamente lo que más nos plazca, sino que es necesario tratar de completar los axiomas de la teoría de conjuntos hasta que la hipótesis del continuo quede resuelta. Gödel consideraba que debemos tratar de profundizar en la teoría añadiéndole nuevas leyes, del mismo modo que en física se buscan sin cesar nuevas leyes que perfeccionen nuestra descripción del mundo.

La reacción habitual del formalista ante la doctrina realista consiste en preguntar: “Pero, ¿con qué criterios se puede juzgar deseable la inclusión de tal axioma, en lugar de su negación, si sabemos que ni uno ni otro van a producir contradicciones, como es el caso de la hipótesis del continuo?” A lo que el realista responde: “¡Hay que proceder como de costumbre! Debemos seleccionar nuestros nuevos axiomas basándonos en su evidencia *a priori*, en su fecundidad, y, por qué no, en la simplicidad y la armonía del mundo que nos permitan entrever.”

En lo que atañe a la hipótesis del continuo carecemos de evidencias *a priori* (ni en favor ni en contra) y los lógicos no están completamente de acuerdo sobre lo que sea natural y armonioso en su disciplina. Los criterios apriorísticos no parecen ser, pues, de ayuda en este caso. Sea como fuere, no gozan de unanimidad.

Por lo que a la fecundidad se refiere, hemos visto que el axioma de determinación proyectiva es muy satisfactorio. Pero su evidencia *a priori* deja mucho que desear. En puridad cabría defender la idea de que el axioma de determinación completa (“todos los subconjuntos de R son conjuntos determinados”) es natural de por sí, por analogía con el caso finito, pero no sucede así con el axioma de determinación proyectiva. Los argumentos en favor de éste son *a posteriori*, lo cual ni basta para convencer a los formalistas ni resulta completamente satisfactorio para los realistas.

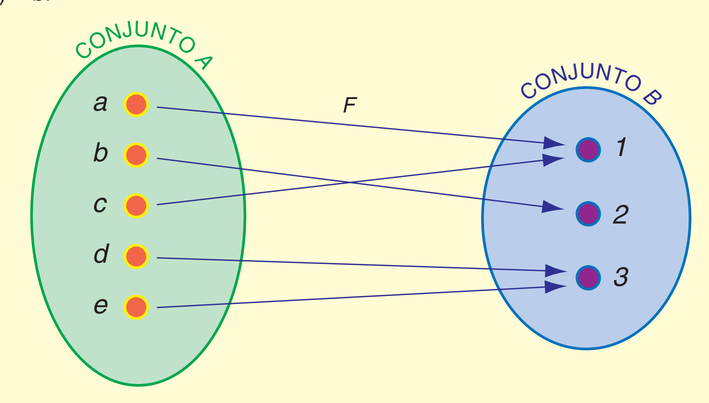
Uno de los grandes éxitos de estos últimos años en el campo de la lógica ha sido el descubrimiento, por H. Woodin, D. Martin y J. Steel, de un argumento apriorístico para el axioma de determinación proyectiva. Se trata de un argumento indirecto, pero vale la pena comprenderlo: nos lleva a los grandes números cardinales que se encuentran en el centro de los trabajos de teoría de conjuntos desde hace veinte años.

Parece indudable que, si el mundo de los conjuntos existe, tiene que ser lo más grande posible. Sería absurdo considerar que termina a tal o cual nivel, si cupiese la posibilidad lógica de concebirlo mayor. El mundo de los conjuntos, por una especie de principio de maximización, debe ser todo lo grande que la lógica consienta.

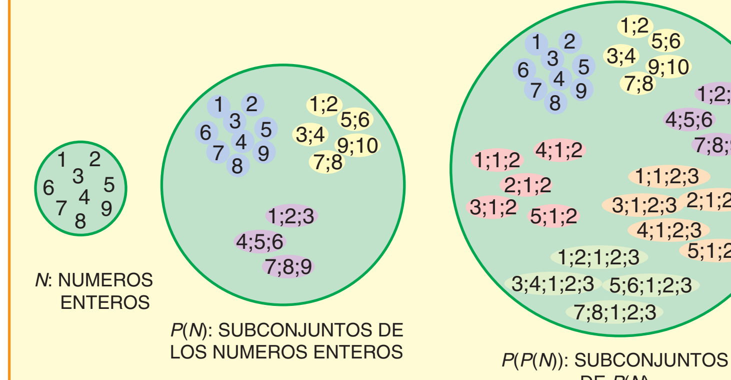
Resulta de lo dicho que siempre que se encuentre un axioma que afirme la existencia de grandes conjuntos —axiomas que se denominan de cardinales grandes— y siempre que tal axioma no introduzca contradicciones, deberemos adoptarlo. Cualquier axioma de cardinales grandes es válido *a priori*.

4. UN AXIOMA DE CARDINALES GRANDES

Una suprayección de A sobre B es una aplicación F que alcanza todo punto de B: para todo elemento b del conjunto B existe un elemento a del conjunto A tal que $F(a) = b$.



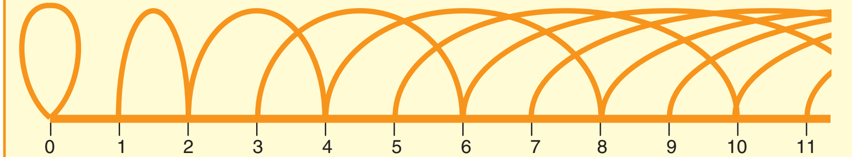
Si existe una suprayección del conjunto A sobre el conjunto B, se dice que A es mayor que B. Si además no existe ninguna suprayección de B sobre A, se dice que A es estrictamente mayor que B.
Cantor demostró que el conjunto $P(A)$ de todos los subconjuntos de un conjunto A es siempre estrictamente mayor que el conjunto A. De esto se deduce la existencia de una infinidad de conjuntos cada vez mayores, N, $P(N)$, $P(P(N))$... y también que no existe el conjunto de todos los conjuntos.



He aquí un ejemplo de axioma de cardinales grandes: existe un conjunto no numerable A tal que, si A es estrictamente mayor que B, entonces A es también estrictamente mayor que el conjunto $P(B)$ de los subconjuntos de B.

5. LOS AXIOMAS DE CARDINALES GRANDES SON CUESTION DE FE

Un conjunto es infinito si existe una inyección del conjunto en una parte propia, esto es, una parte que no es el conjunto total. (En una inyección, o aplicación inyectiva, elementos distintos tienen siempre imágenes diferentes.) Por ejemplo, la aplicación $n \rightarrow 2n$ es una inyección del conjunto de los enteros en uno de sus subconjuntos propios (el de los enteros pares).



Un conjunto para el que exista una aplicación inyectiva de sí mismo en alguna de sus partes propias es un conjunto muy grande. La noción de aplicación inyectiva es fecunda. Imponiendo a las inyecciones la verificación de propiedades cada vez más numerosas, se definen infinitos cada vez más estrictos, es decir, conjuntos cada vez mayores. Este es uno de los métodos para definir axiomas de cardinales grandes.

Los axiomas de cardinales grandes son considerados naturales, pues si el mundo de los conjuntos existe, ha de contener el máximo posible de ellos, como consecuencia de lo cual todos los conjuntos grandes son bien recibidos en él.

Sin embargo, en la mayoría de los casos, estos axiomas constituyen enunciados indecidibles de la teoría de conjuntos, en el sentido de Gödel: con los axiomas habituales no podemos demostrar que son verdaderos ni que son falsos. Hay que aceptarlos, pues, tal como son, sin que podamos esperar demostrarlos a partir de los demás. Se trata de una cuestión de fe.

Los axiomas de cardinales grandes son útiles en aritmética, ya que tienen por consecuencia la no contradicción de la teoría de conjuntos. También son útiles para nutrir la imaginación del matemático y para clasificar los indecidibles.

Sea como fuere, la noción de verdad matemática se torna vacilante al entrar en contacto con infinitos que desbordan la imaginación.



Semejante justificación puede parecer extraña y arriesgada, pero no lo es más que la utilizada para axiomatizar los números enteros cuando se afirma que todo número entero tiene un siguiente. Cuando se investigan nuevos axiomas nos vemos reducidos a consideraciones heurísticas de este género y las atinentes a conjuntos grandes me parecen perfectamente satisfactorias (más adelante veremos que también hay justificaciones *a posteriori* de los axiomas de cardinales grandes).

Como cualquier axioma de cardinales grandes está justificado *a priori*, todo cuanto resulte de uno de ellos lo está igualmente. El descubrimiento de Woodin, Martin y Steel, efectuado hace ya algunos años, de que ciertos axiomas de cardinales grandes implicaban el axioma de determinación proyectiva ha hecho realidad las esperanzas de quienes proponían la adopción del axioma de determinación proyectiva: no sólo disponemos de razones *a posteriori* para adoptarlo; también las hay *a priori*, con lo que el matemático realista queda satisfecho. Un número importante de quienes investigan la teoría de conjuntos considera que el axioma de determinación proyectiva es un axioma serio, que es preciso aceptar y añadir a la teoría clásica ZFC.

Llegado a este punto, el lector espera con impaciencia que se le describa un número cardinal grande o, mejor todavía, que se le indique un procedimiento para construirlo. Por desgracia tal cosa no es posible: los conjuntos construidos "desde abajo", mediante uniones e intersecciones de conjuntos de enteros, de conjuntos de números reales o de conjuntos de funciones, no proporcionarán jamás un gran cardinal. Ello no es motivo para rechazarlos, de igual modo que no se rechaza el número π porque no sepamos calcular el conjunto de sus cifras decimales. La incidencia de los cardinales grandes sobre la determinación proyectiva demuestra a las claras que su existencia no carece de efecto sobre las matemáticas ordinarias. De igual forma que los enteros muy grandes, como pueda ser $10^{10^{10}}$, constituyen abstracciones impensables pero indispensables, los cardinales grandes son también impensables e indispensables.

Es preciso mencionar un resultado más difuso logrado en teoría de conjuntos y que proporciona una razón *a posteriori* para adoptar los axiomas de cardinales grandes.

Señalemos ante todo que existe un límite evidente a la aceptación de cardinales grandes que no hemos mencionado hasta el momento: sus compatibilidades mutuas. En efecto, si ciertos enunciados que afirmen la existencia de conjuntos grandes se contradicen, resulta imposible aceptarlos todos y es preciso elegir. Esta idea de que dos axiomas de cardinales grandes puedan contradecirse vuelve a constituir un criterio capaz de discriminar las concepciones formalista y realista en la filosofía de las matemáticas: si hubiera axiomas de cardinales grandes que se contradijeran, resultaría que los conjuntos se quedaban en ficciones (pues, en tal caso, sería insostenible la defensa de una realidad única, que es la razón de todo, y se volvería de nuevo a la noción de que las extensiones aceptables de ZFC quedan a la libre elección del matemático); por el contrario, si no se encontraran, sería razonable creer que existe algo real tras los formalismos.

Las investigaciones realizadas en los últimos treinta años han desembocado en una situación notable e inesperada, que viene a reforzar la posición de los realistas, al tiempo que proporciona un argumento *a posteriori* en favor de todos los axiomas de cardinales grandes. A pesar de las decenas y decenas de teoremas

sobre sus relaciones mutuas, no se han encontrado nunca axiomas de cardinales grandes que sean incompatibles; por el contrario, se ha percibido que se agrupan entre sí como si verdaderamente describieran una realidad jerarquizada, de conformidad con las esperanzas del realista. A. Kanamori y M. Magidor consideran que "este aspecto jerárquico de la teoría de cardinales grandes resulta un poco misterioso, pero constituye también un poderoso argumento en favor de la adopción de axiomas de cardinales grandes y del hecho de que proporcionan las extensiones naturales de ZFC".

El mundo conjuntista se muestra organizado y no hay arbitrariedad en los axiomas que se deben añadir a ZFC para dar cuenta de ello: parecen dictados por necesidades exteriores que podemos asimilar a una realidad independiente. La comprobación empírica de este orden en los conjuntos extensos refuerza los argumentos apriorísticos para los cardinales grandes.

Señalemos que cierto número de enunciados (con una excepción de importancia, sobre la cual volveremos), independientes de los axiomas habituales de la teoría de conjuntos, han resultado ser equivalentes a axiomas de cardinales grandes; de este modo, todo cuanto parezca razonable aceptar por argumentos *a posteriori* (como es el caso del axioma de determinación proyectiva) es consecuencia también de hipótesis de cardinales grandes, y está, por tanto, justificado *a priori*.

En opinión de H. Woodin, "la jerarquía de cardinales grandes parece igual de intrínseca y de absoluta que los propios números enteros. Constituye uno de los grandes descubrimientos en teoría de conjuntos de los últimos treinta años".

Volvamos por un momento sobre la hipótesis del continuo. ¿Es posible zanjarla definitivamente de una forma que pudiera considerarse natural, como en el caso del axioma de determinación proyectiva, y demostrar, por ejemplo, que ella (o su negación) es consecuencia de un axioma de cardinales grandes? Desdichadamente no, porque hay razones teóricas de que la hipótesis del continuo no se podrá tratar completamente con un axioma de cardinales grandes.

No obstante, con el axioma de determinación proyectiva y la armoniosa organización descubierta en los axiomas de cardinales grandes se ha avanzado también en la hipótesis del continuo. En efecto, el axioma de determinación proyectiva, considerado como adjunto a los demás axiomas, permite tratar mejor la cuestión de saber si todos los subconjuntos de *R* son numerables o tienen la potencia del continuo (que es la cuestión planteada por la hipótesis del continuo). Merced al axioma de determinación proyectiva se puede concluir que todo conjunto proyectivo o bien es numerable o tiene la potencia del continuo. Esta incidencia del axioma de determinación proyectiva sobre la hipótesis del continuo no lo arregla todo, pero crea la convicción de que se ha progresado y de que se podrá avanzar más gracias a estos métodos.

Cabe, por una parte, imaginar que con la formulación de axiomas de cardinales grandes cada vez más potentes será factible progresar indefinidamente y tratar "asintóticamente" todos los casos posibles. Se puede, por otra, sacar la lección que enseña el trabajo sobre el axioma de determinación proyectiva, a saber, que incluso en caso de duda resulta interesante examinar axiomas no fundados *a priori* y que el método de la búsqueda de axiomas por argumentos *a posteriori* es fecundo.

Tal vez, al avanzar, podamos formular otros axiomas justificados *a posteriori*, algunos de los cuales podrían resolver la hipótesis del continuo y también identificar más exactamente para qué juegos infinitos existen estrategias de victoria. A juicio de H. Woodin, "esperar que nuestra comprensión progrese hasta el punto de hacer posible la solución de la hipótesis del continuo es ahora una esperanza razonable".

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

HANDBOOK OF MATHEMATICAL LOGIC. J. Barwise, North Holland, Amsterdam, 1977.

REALISM IN MATHEMATICS. P. Maddy, Clarendon Press, Oxford, 1990

THE HIGHER INFINITE, A. Kanamori. Springer-Verlag, Nueva York, 1994.

LARGE CARDINAL AXIOMS AND INDEPENDENCE: THE CONTINUUM PROBLEM REVISITED, en *Mathematical Intelligencer*, vol. 16, n.º 3, págs. 31-35, 1994.

UN RÔLE NOUVEAU POUR LA THÉORIE DES ENSEMBLES? Departamento de Matemáticas, Universidad de Caen, marzo de 1995.

Cuerdas cósmicas conductoras

Fruto de la unión entre la física de las partículas elementales y la cosmología, las cuerdas cósmicas conductoras podrían encerrar la clave del progreso de la astrofísica

Alejandro Gangui y Patrick Peter

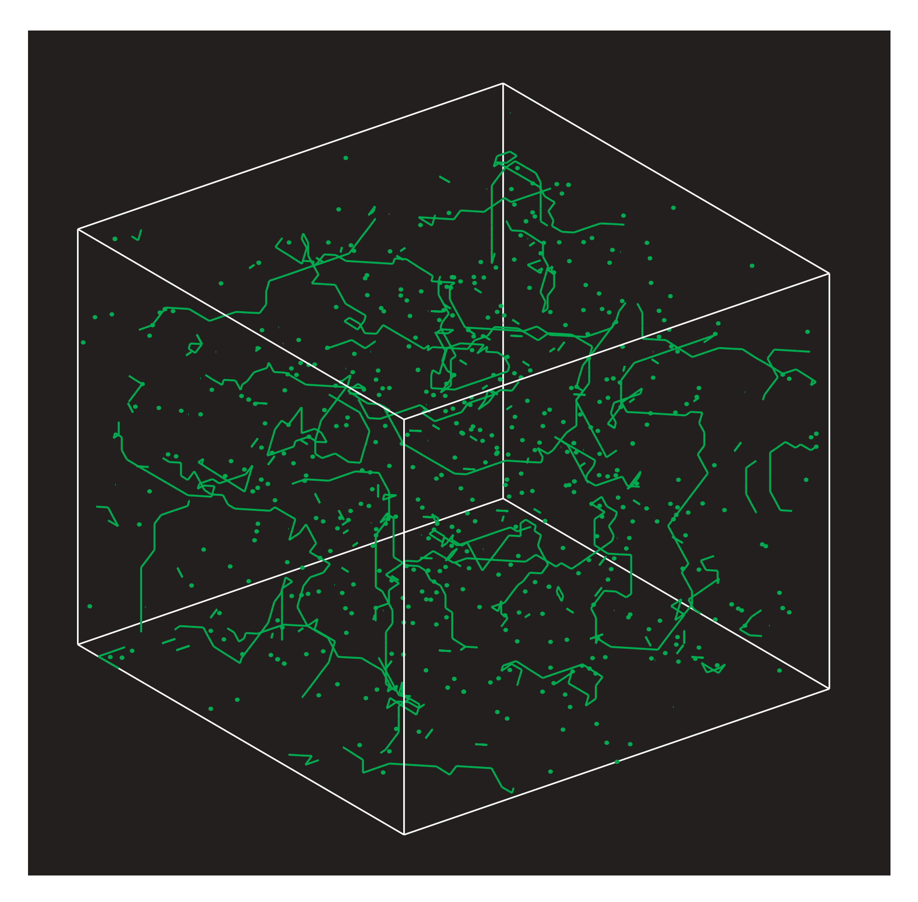
Comprender los fenómenos astrofísicos que nos rodean es uno de los desafíos más interesantes en cosmología. En el universo hay materia perceptible y materia obscura. Al conocimiento de la primera llegamos por la radiación electromagnética emitida. Ignoramos el origen de la segunda. Fogonazos de fotones, repentinos y energéticos, aparecen en el cielo en ráfagas de rayos gamma. Extrañas partículas por identificar se zambullen en la atmósfera terrestre con energías altísimas, producen lluvias de radiación y de nuevas partículas más ligeras y constituyen los rayos cósmicos de ultraalta energía. Para dar cuenta de tales observaciones, las interpretaciones al uso encuentran graves problemas. No siempre los mecanismos aceptados logran explicar los fenómenos que el universo nos ofrece.

La cosmología se plantea, además, otros problemas para los que carece de respuesta. Así, el de la isotropía de la radiación cósmica del fondo de microondas, que nos baña con iguales propiedades desde cualquier dirección, a pesar de que muchas regiones del universo de donde esta radiación procede nunca entraron en contacto causal.

Otro problema fundamental es el de la cantidad de materia del universo. De acuerdo con las observaciones de macroestructuras astrofísicas, el universo contiene una cuantía muy cercana a la densidad crítica. Un poco más de masa, y la atracción gravitatoria entre sus componentes bastaría para detener la expansión; un poco menos, y nuestro universo se expandiría por siempre.

De acuerdo con el modelo estándar de la gran explosión, ese valor crítico es inestable. Si, luego de miles de millones de años, la energía es hoy próxima a la crítica, debió de haberlo sido aún más en el pasado, con una precisión asombrosa de 15 cifras decimales cuando el universo tenía 1 segundo de vida. ¿Qué mecanismo afinó este valor con tamaña exactitud? Lo ignoramos.

Alan Guth propuso en 1981 el modelo del universo inflacionario. Se basa en una expansión cuasiexponencial del universo en sus primeros 10^{-35} segundos de vida. Durante esa expansión acelerada, todas las perturbaciones cruciales, de las galácticas a las que abarcarán nuestro universo actual, habrían sido empujadas fuera del radio de Hubble, siendo éste del orden de la máxima distancia de la cual podemos recibir información hoy.



1. RED DE CUERDAS COSMICAS largas y lazos, obtenida de la simulación de la evolución de las fases aleatorias iniciales del campo de Higgs en una región del universo (figura cortesía de M. Sakellariadou). En el caso de cuerdas dotadas de propiedades conductoras, los lazos podrían alcanzar configuraciones de equilibrio y convertirse en vortones; ello impediría su desintegración radiativa. Una tal población de vortones podría poner en peligro el modelo estándar de la cosmología, a menos que las cuerdas se formasen a energías bajas.

El radio de Hubble, en un tiempo t, corresponde a la distancia recorrida por un fotón desde la gran explosión ($t = 0$) hasta t. Se rechaza la conexión causal con regiones del universo separadas por distancias mayores; puesto que ninguna señal puede propagarse a velocidad mayor que la de la luz, no existe ningún proceso microfísico entre tales regiones.

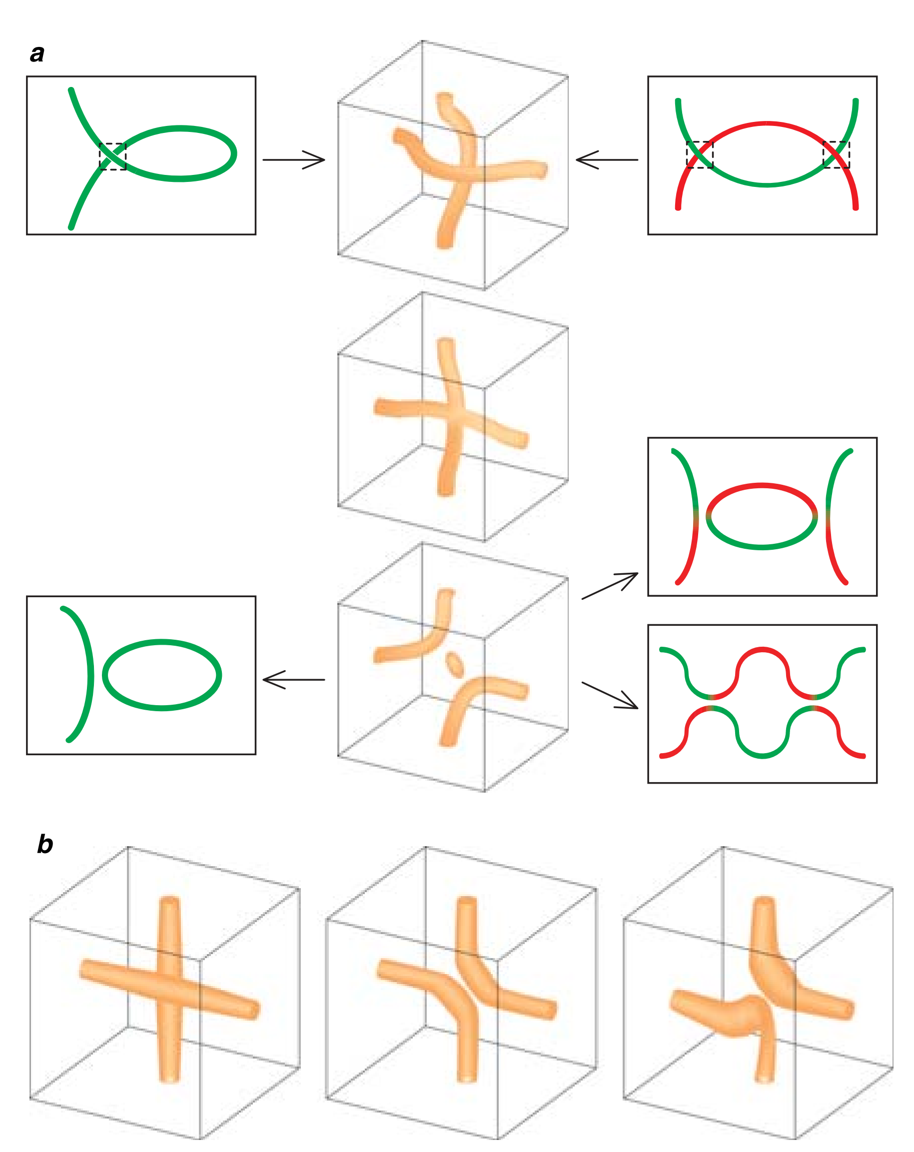
El modelo inflacionario supone que todas las perturbaciones nacen de fluctuaciones cuánticas desarrolladas en el interior del radio de Hubble; estarían, pues, conectadas por vínculos causales. Por eso detectamos la radiación de fondo uniforme (a nivel de una parte en 100.000) en cualquier dirección del cielo hacia donde apuntemos nuestra antena.

Durante la inflación, la densidad de energía crítica constituye un atractor, lo que explica por qué vivimos en un universo próximo al crítico. Además, las fluctuaciones cuánticas microscópicas primordiales experimentaron unos estiramientos enormes hasta convertirse en perturbaciones clásicas de la distribución de la densidad de materia. A través de la atracción gravitatoria, las perturbaciones serían responsables de la formación de galaxias y cúmulos.

Pero la inflación no despeja todos los interrogantes. Obliga a ajustar algunos parámetros de la teoría a determinados valores para que las macroestructuras generadas y la amplitud de las anisotropías inducidas en la radiación de fondo no sobrepasen lo que se observa en la actualidad.

Hay otra clase de modelos, la de los defectos topológicos cósmicos. Pese a su carácter especulativo, ofrecen la ventaja de que en un futuro cercano podrían someterse a verificación observacional. Los defectos topológicos permiten establecer un puente entre la física de partículas y la cosmología y la física del estado sólido. Abren el camino para comprender los primeros instantes del universo a través de analogías con experimentos de laboratorio. Los defectos topológicos poseen propiedades peculiares que los han convertido en candidatos idóneos para la explicación de la generación de anisotropías y de la polarización en el fondo de microondas, así como la generación de perturbaciones necesarias para la formación de galaxias.

Entre los modelos de defectos topológicos propuestos, las cuerdas cósmicas constituyen la variedad más estudiada. No nos referimos a las cuerdas fundamentales, substitutos



2. INTERACCION ENTRE CUERDAS y formación de lazos. Cuando dos segmentos de cuerdas cósmicas interaccionan, primero sufren una ligera deformación, luego se fusionan en un nudo y, por fin, intercambian cabos o interconmutan (*a*). Una acumulación inestable de energía de lo que era el nudo se desintegra en una ráfaga de partículas de gran unificación. En la figura se muestra la formación de lazos, ya sea por el pliegue de una misma cuerda (*izquierda*), ya sea por interacción entre dos cuerdas distintas (*derecha*). En *b* se ilustra la interconmutación de cuerdas conductoras simuladas por P. Laguna y R. Matzner en 1990. Estos mostraron que, en ciertos casos, las corrientes de distintas cuerdas convergían en el punto de interacción, cancelándose mutuamente, aunque generando un crecimiento de la densidad de la carga eléctrica (ensanchamiento de las cuerdas). En sus simulaciones este exceso de carga se disipa y no altera la descripción simple de (*a*).

unidimensionales de las partículas elementales, sino a finas líneas de material primordial con una densidad de energía extraordinaria. Las cuerdas cósmicas se desplazan a velocidades relativistas y curvan el espacio que las rodea a su paso. Gracias a sus interacciones gravitatorias, las cuerdas generan concentraciones de materia para la formación de macroestructuras, perturban estas estructuras astrofísicas generando velocidades de deriva y curvan rayos de luz procedentes de cuásares o galaxias lejanas.

Las cuerdas cósmicas perturban el fondo cósmico de radiación, ya sea 100.000 años después de la gran explosión (cuando la materia no-relativista se desacopló de la radiación), ya sea durante el viaje de los fotones del fondo cósmico hacia nosotros. Sus movimientos rápidos y sus múltiples interacciones producen una red de cuerdas largas y de lazos

cuya desintegración podría llenar el universo con un fondo de ondas gravitatorias.

Según unos modelos, las cuerdas cósmicas desarrollan en el transcurso de su evolución intensas corrientes eléctricas, clave para la generación de campos magnéticos primordiales a escalas protogalácticas. Además, el movimiento rotatorio de los portadores de carga eléctrica ayuda a sostener pequeños lazos de cuerdas y contrarrestar su desintegración radiativa. Los lazos, estables, pueden entonces sobrevivir hasta nuestros días y formar parte de la materia obscura no bariónica.

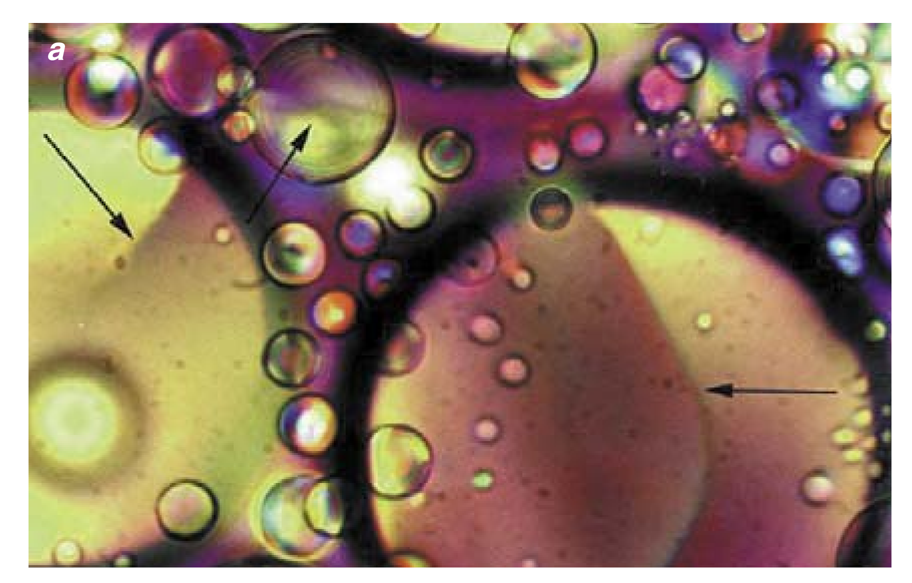
Las teorías de gran unificación proporcionan el marco matemático en el que, con excepción de la gravedad, se integran las fuerzas fundamentales, relacionadas entre sí en términos de simetría, cuya ruptura da origen a las leyes físicas. En el curso de la expansión y enfriamiento del universo, la interacción gravitatoria, la interacción fuerte, la débil y la electromagnética fueron adoptando sus propias identidades.

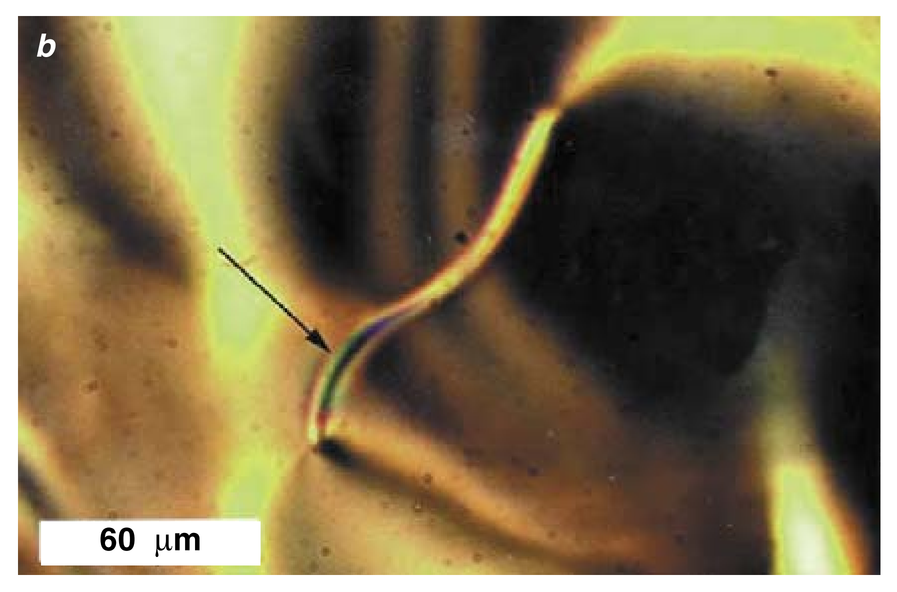
En el contexto del modelo estándar, la ruptura espontánea de simetrías fundamentales se realiza en forma de transiciones de fase en el universo temprano. Una transición de fase es un cambio abrupto en una o más propiedades físicas de un sistema cuando su temperatura varía en forma continua. Ejemplos son la transición quark-hadrón, producida al microsegundo de vida de nuestro universo, y la transición electrodébil, cuando el universo contaba con apenas una parte en 10^{12} de segundo de vida y tenía tan sólo una parte en 10^{15} su tamaño actual.

Serían muchas las simetrías rotas con el paso del tiempo. En cada una de estas transiciones el espaciotiempo se orienta por la presencia de un campo de Higgs, hipotético campo de fuerzas que se extiende por el espacio. Esta orientación señala la transición de un estado de alto grado de simetría hacia un estado final donde las leyes físicas del sistema en estudio obedecen a un grupo de simetría menor.

Lo entenderemos con el símil de la transición del agua al hielo. La formación de la estructura cristalina del hielo, donde las moléculas se distribuyen en un enrejado definido, rompe la simetría que el sistema poseía cuando éste se encontraba en fase líquida, cuando no se privilegiaba ninguna dirección particular. De la misma manera, la orientación del campo de Higgs quiebra el estado simétrico entre partículas y fuerzas.

En 1976 Thomas Kibble, del Colegio Imperial de Londres, consideró un modelo en el que la transición de fase se producía mediante la formación de dominios sueltos que, andando el tiempo, entrarían en coalescencia, dejando defectos a su paso. El campo de Higgs se ve alterado por fluctuaciones cuánticas y térmicas que influyen en su dinámica. Si no hay, pues, razones para que su comportamiento sea uniforme en el espacio, cabe suponer que en distintas regiones del espacio el campo de Higgs adquirió una orientación diferente. Cuando estas regiones entraron en contacto, resultó difícil para los dominios de orientación distinta ajustarse y encajar suavemente. Estos desperfectos del campo de Higgs serían ejemplos de increíbles cantidades de energía: semejantes defectos





3. NUCLEACION DE PEQUEÑAS BURBUJAS NEMATICAS durante la transición de fase a partir de un compuesto isótropo de cristal líquido, después de disminuir la temperatura. En la figura superior las flechas indican irregularidades propias de las burbujas que se originan por efectos de frontera. Las irregularidades generan defectos topológicos en el compuesto. La colisión posterior de las burbujas más pequeñas provocará otros defectos estables, análogos a los defectos topológicos cósmicos. En la figura inferior aparece una disclinación lineal, ejemplo de defecto sumergido en la fase nemática del cristal líquido. [Fotografía microscópica con luz polarizada de compuesto mezcla con predominancia de pentilcianobifenilo, cuyo punto de transición de fase isotropo-nemática es del orden de 65 grados centígrados. Figura y adaptación del texto cortesía de O. D. Lavrentovich, de la Universidad estatal de Kent.]

cósmicos atrapan en su interior el estado físico del universo en épocas precoces y en condiciones de energía tan altas, que serían imposibles de reproducir en los aceleradores actuales.

Los defectos topológicos pueden reproducirse en el laboratorio. En 1985, Wojciech Zurek, del Laboratorio Nacional de Los Alamos, propuso usar la transición del ^{4}He normal a superfluido para mostrar que, tras un enfriamiento repentino, aparecerían defectos en todos los rincones del sistema. Mediante el estudio de sus propiedades se obtendrían pistas útiles para la cosmología.

No era fácil abordar la transición superfluida del helio. Se precisaban temperaturas muy bajas (alrededor de 270 grados bajo cero) y condiciones de laboratorio extremas. La dificultad se soslayó operando tests similares con cristales líquidos, compuestos orgánicos con fases intermedias entre las fases sólida y liquida. Además de fluir, poseen propiedades de sólidos cristalinos. Podemos imaginarlos como cristales cuyas moléculas, pese a haber perdido parte de su orden posicional, han retenido cierto orden de orientación. Las moléculas de cristales líquidos nemáticos, en barra, miden unos 20 angstroms (20×10^{-10} m) de longitud; con su tendencia a organizarse en paralelo, evidencian propiedades ópticas muy útiles. Los cristales líquidos sufren transiciones de fase a temperaturas que varían de 10 a 200 grados centígrados y generan estructuras detectables a simple vista o con el microscopio. Tras un período transitorio, surgirán en el sistema defectos individuales. Pero, notemos que si bien existen analogías entre defectos en cristales y en el universo primordial, también hay diferencias. En sistemas de materia condensada la dinámica es no-relativista y dominada por la fricción. Además, no sólo se formarán defectos en los puntos de colisión entre dominios sino que en el interior mismo de las burbujas nemáticas, por ejemplo, ya existen defectos puntuales y líneas de disclinación, debidas en gran medida a efectos de frontera.

Varios grupos han llevado a la práctica la idea original de Zurek, usando, en lugar de ^{4}He, la transición superfluida del ^{3}He. Allí se observó la producción copiosa de vórtices cuantizados, el análogo de las cuerdas cósmicas en física de la materia condensada. Los tests con cristales líquidos y helio suministran cierta confirmación experimental de los modelos con defectos topológicos cósmicos.



4. ESTRUCTURA astrofísica plana de alta densidad de materia generada a partir de la estela dejada a su paso por una cuerda cósmica con estructura microscópica. (Figura cortesía de P. Avelino y P. Shellard.)

Estos modelos asumían en un principio que las transiciones de fase acontecerían a temperaturas del orden de 10^{16} GeV (donde GeV es gigaelectronvolt, 10^9 eV y corresponde a 10.000 veces la temperatura del núcleo estelar al inicio de un colapso de supernova). En cosmología se hizo frecuente hablar de temperatura y energía sin hacer distinción: nos referimos a la energía de movimiento promedio que una partícula dada tiene a esas temperaturas. Temperaturas de 10^{16} GeV corresponden a energías de gran unificación. Si ahora descendiéramos unos 14 órdenes de magnitud, nos encontraríamos con las energías más altas alcanzadas por los aceleradores de partículas, la escala electrodébil. En todo este rango de energías no hay modelos absolutamente convincentes.

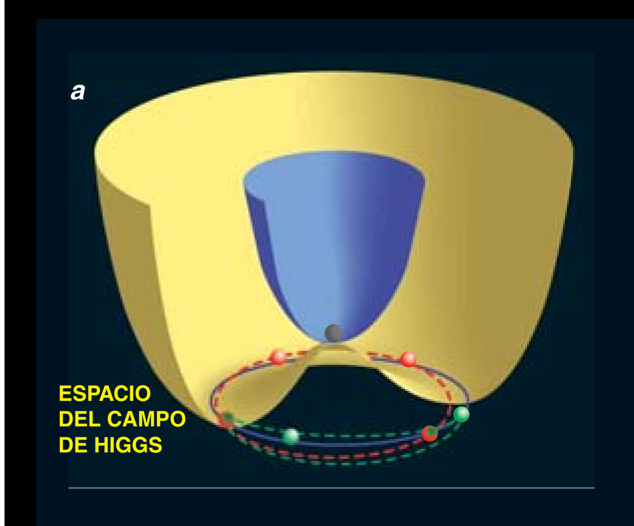
Si existieron defectos en el pasado, podrían ayudar a resolver muchos interrogantes. Los defectos topológicos, las cuerdas en particular, poseen quizás una estructura muy rica. En modelos unificados genéricos, el campo de Higgs, responsable de la existencia de la cuerda, interaccionará con otros campos fundamentales. Si algún campo del modelo porta carga eléctrica y si logra condensarse en el espacio interior de la cuerda, el resultado genérico es la presencia de corrientes eléctricas que fluyen a lo largo del núcleo de la cuerda. Aunque estas cuerdas son las más atractivas, el hecho de contener propiedades electromagnéticas no es imprescindible para la cabal comprensión de la dinámica de los lazos.

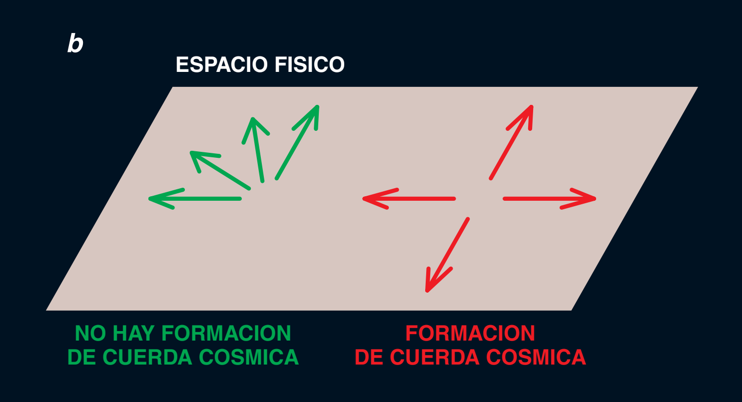
Existen soluciones estacionarias de partículas en orbitales cuánticos, donde la inmensa tensión de la cuerda se ve compensada por el momento angular de las cargas. A esos lazos que se encuentran en estos estados estacionarios se les llama vortones. Las configuraciones de vortones no emiten radiación. Desde lejos, los vortones parecen masas puntuales con cargas eléctricas cuantizadas y momento angular también cuantizado. En este sentido se asemejan a las partículas, y de ahí su nombre.

El tamaño característico de los vortones es del orden de su número de cargas electrónicas —un centenar— multiplicado por su grosor, lo que resulta ser unos 14 órdenes de magnitud inferior al radio clásico del electrón. En modelos de gran unificación son unos 20 órdenes más pesados que el electrón.

Ahora bien, ¿por qué las cuerdas se convierten en conductoras? La física que rige en el núcleo de la cuerda difiere de la física del exterior. En particular, la existencia de interacciones entre el campo de Higgs y otros campos fundamentales, como el de fermiones cargados, permite a éstos perder su masa en el interior de la cuerda. Bastaría así muy poca energía para crear pares de fermiones y, por carecer de masa, éstos podrían propagarse a la velocidad de la luz a lo largo del núcleo de la cuerda. Tales estados fermiónicos dotan de corrientes a la cuerda y, en el caso de lazos, proveen el soporte de momento angular necesario para estabilizarlos

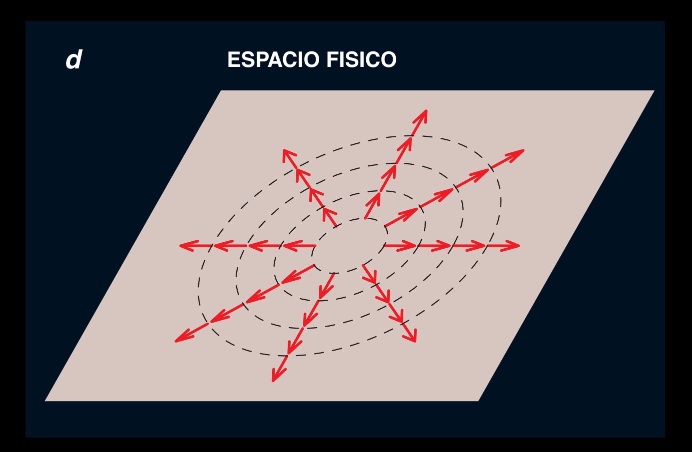
Formación de cuerdas cósmicas





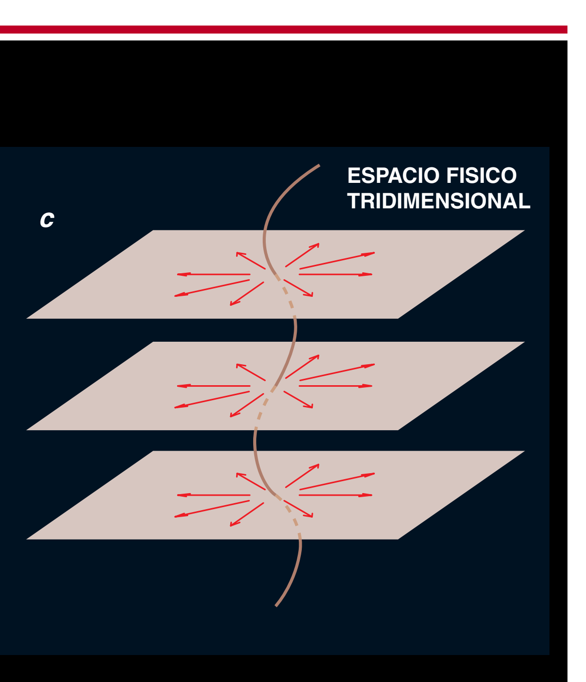
El campo de Higgs evoluciona en un potencial (*superficie azul*) que representa un estado de alto grado de simetría, centrado en el valor cero del campo. A fin de minimizar su energía, a una temperatura dada el campo tratará de permanecer en la base del potencial. Durante la transición de fase, el universo entero se enfría y este potencial adquiere una forma nueva (*superficie amarilla*) desarrollando una circunferencia de mínimos equivalentes (*en violeta*). Nuevamente, al querer minimizar su energía el campo de Higgs elegirá espontáneamente un nuevo mínimo (una orientación particular) a lo largo de esta circunferencia (*a*).

Diferentes regiones del universo, sin ninguna vinculación causal, terminarán con orientaciones arbitrarias del campo de Higgs. En ciertas ocasiones, una curva cerrada en el espacio físico intersecará regiones con todas las orientaciones posibles del Higgs (*flechas rojas, correspondientes a la línea punteada roja en* [*a*]). En este caso, una cuerda cósmica atravesará algún punto interior a la curva cerrada. En opción alternativa,



En un experimento mental podemos contraer la curva de todas las orientaciones posibles del Higgs en el espacio físico. El campo se verá obligado a dar la vuelta más deprisa alrededor de esta curva. En el límite en que la curva se convierte en un punto, el campo no puede ya tomar una dirección determinada, sino que valdrá cero. En cuyo caso, el campo de Higgs se localiza en la cima de la joroba central del potencial (*superficie amarilla*);

Y entendemos el origen del nombre *defectos topológicos*. La circunferencia violeta de mínimos de energía *no* incluye el punto (*en el gráfico, a*) donde el campo de Higgs se anula. A fin de tomar el valor cero en algún punto (como debe hacerlo, de acuerdo con *d*), el campo Higgs se ve forzado a abandonar este espacio. Por tanto, las propiedades globales o topología de esta circunferencia posibilitan la existencia de la cuerda. De la misma manera, las cuerdas cósmicas estables no pueden tener cabos o extremos libres, ya que todo segmento de longitud finita se contraería



las flechas verdes muestran una situación en que ninguna cuerda corta el plano (*b*).

Si ahora extendemos este mecanismo al espacio tridimensional, las regiones del plano cortado por una cuerda pueden superponerse y así reconstruir la localización de ésta. Las estructuras lineales resultantes constituyen las cuerdas cósmicas (*c*).

se ve, pues, forzado a abandonar la circunferencia (*violeta*) de mínimos. Esta diferencia energética es enorme. Uniendo todos los puntos espaciales donde el Higgs se anula, formamos la cuerda (*c*); se explica así por qué estas cuerdas engendran finas líneas que encierran energías extraordinarias (*d*).

debido a la tensión y desaparecería de la red de cuerdas. Las cuerdas cósmicas sólo pueden tener longitudes mucho mayores que el radio de Hubble (ser infinitas) o formar lazos cerrados.

y contrarrestar su desplome.

Si todo acabara ahí nos hallaríamos ante un grave problema, pues los vortones, objetos estables, no se desintegrarían. Sobreabundarían, por contra, en franca contradicción con la cosmología estándar. Pudiera también suceder que las corrientes sucumbiesen ante transiciones de fase posteriores y, de esa manera, los vortones se disiparan. Otra manera de eliminar el exceso de defectos sería apelando a las autointeracciones electromagnéticas en el estado macroscópico de la cuerda conductora. En la cercanía de la cuerda, el campo electromagnético interactúa con la corriente que lo generó, con la modificación consiguiente de la ecuación de estado de la cuerda. Estas modificaciones alejan la distribución final de vortones de la que hubiera existido en ausencia de interacciones, reduciendo su densidad futura.

De las interacciones entre cuerdas largas nacen los lazos. Igual que sus progenitoras, los lazos se moverán a velocidades relativistas y emitirán radiación gravitatoria. Tienden a contraerse, mientras que las corrientes, aunque inicialmente débiles, irán condicionando la dinámica del lazo. Además, la tensión de la cuerda tratará de minimizar la curvatura de la configuración, lo que resultará en un anillo casi circular y en rotación.

Una vez que el lazo ha adquirido la forma de anillo, está aún por ver si se convertirá o no en un vortón, una configuración de equilibrio. Para el análisis de estabilidad se acude a un formalismo ideado por Brandon Carter sobre la relación entre la densidad lineal de masa y la tensión de la cuerda. Dicha relación constituye la ecuación de estado necesaria para la descripción macroscópica de la cuerda.

Utilizamos el formalismo para el estudio de anillos circulares con corrientes eléctricas, incluidas las contribuciones debidas al campo electromagnético alrededor de la cuerda, y obtuvimos una descripción completa de la dinámica en función de su masa total, momento angular y número de cargas de la configuración. Las correcciones electromagnéticas en la ecuación de estado macroscópica tendían a reducir el número de vortones. De ese modo, una configuración estable, correspondiente a un acoplamiento electromagnético débil, se torna inestable hasta desplomarse si su masa inicial es demasiado grande, en el caso de acoplamiento intermedio. Pero el colapso será inevitable e independiente de la masa inicial ante un intenso acoplamiento electromagnético.

El problema del exceso de vortones admite ahora el siguiente enunciado. Si las cuerdas y sus corrientes se formaron en la época de la gran unificación, si esas corrientes persisten a lo largo del tiempo, a escala cosmológica, y si la distribución de anillos es tal que una fracción no despreciable de ellos logró sobrevivir lo suficiente, entonces el universo se habría inundado con estos defectos topológicos y, por culpa de este exceso de materia, habría colapsado.

Puesto que no se produjo tal catastrófico desplome, la salida más simple, dados los 14 órdenes de magnitud en energía entre la escala de gran unificación y la electrodébil, estriba en conceder que las cuerdas aparecieron a temperaturas inferiores. O lo que es lo mismo, en momentos más tardíos de la historia del universo. Con ello, las cuerdas podrían explicar el origen de una parte de la materia obscura. De acuerdo con estimaciones actuales, los vortones podrían sumar hasta un 6 % de la masa crítica del universo, si la transición de fase fue cercana a la escala electrodébil. Las cuerdas posibilitarían también un escenario para la generación de los rayos cósmicos de mayor energía.

Hasta ahora las cuerdas cósmicas se mueven en el terreno de los constructos teóricos. Para demostrar su existencia, habrá que hallar en el universo su sello característico. Sólo las cuerdas de gran unificación están capacitadas para inducir campos gravitatorios cuya intensidad generaría las fluctuaciones de densidad de materia que luego formaron macroestructuras y determinaron anisotropías en el fondo cósmico de radiación.

Estas cuerdas tienen un grosor de 1 parte en 10^{30} de centímetro, mientras que su masa alcanza valores del orden de 10^{16} toneladas por centímetro. Por mor de comparación, recordemos que las estrellas de neutrones tienen una masa similar a la solar, pero cuentan con un radio de 10 km; su densidad de masa es entonces de alrededor de 10^{9} toneladas por centímetro cubico. Ni aunque apretujáramos mil millones de estrellas de neutrones en el tamaño de un electrón, alcanzaría-

ALEJANDRO GANGUI y PATRICK PETER trabajan en el departamento de astrofísica relativista y cosmología del Observatorio de París-Meudon. Gangui combina su interés por la radiación cósmica de fondo con los aspectos observacionales de los defectos topológicos. Peter investiga sobre la estructura interna de los defectos topológicos cósmicos.

mos la densidad de materia-energía característica de las cuerdas de gran unificación.

Porque la tensión típica de estas cuerdas es del mismo orden de magnitud que su densidad lineal de masa, las cuerdas oscilan a velocidades relativistas, lo que incrementa la probabilidad de autointeracciones y, por ende, la producción de lazos. Estos movimientos posibilitan, además, la creación de *cusps*, pliegues puntiagudos en regiones de alta energía de las cuerdas. En estas regiones la emisión de las partículas cargadas interiores se verá favorecida.

El efecto de lente gravitatoria sirve de herramienta para diagnosticar la distribución de masa en el universo. Consideremos las propiedades gravitatorias de una cuerda cósmica, que idealizamos como perfectamente recta. De acuerdo con la relatividad general de Einstein, la presencia de materia-energía curva el espaciotiempo en sus alrededores; este tejido espaciotemporal modificará, a su vez, la trayectoria de las partículas. En el caso de nuestra cuerda recta, baste considerar la forma en que se modifica el espacio que la rodea.

La presencia de la cuerda hace que el espacio circundante posea las características euclidianas usuales, aunque con la forma global de un cono. Un observador que viajara alrededor de la cuerda no percibiría curvatura alguna, y por ende no sentiría la atracción gravitatoria. Pero, al mirar hacia el espacio lejano, no vería repetirse las estrellas luego de una revolución completa de 360 grados alrededor de la cuerda sino luego de un ángulo ligeramente menor. Este ángulo de déficit es realmente pequeño, no mayor que unos pocos segundos de arco en el caso de cuerdas de gran unificación.

Fotones, átomos y polvo interestelar, si pasaran cerca de la cuerda, sufrirían una desviación de sus trayectorias del orden de este ángulo de déficit. En este efecto peculiar hallamos una de las primeras herramientas para detectar las cuerdas. Un segmento de cuerda que pasara entre nosotros y una fuente de radiación lejana, un cuásar por ejemplo, dividiría los rayos de luz y engendraría una imagen doble. Este efecto, independiente del parámetro de impacto (distancia entre los rayos y el deflector), diferiría del producido por otros objetos (agujeros negros, estrellas de neutrones o galaxias) en que las imágenes no sufrirían intensificación relativa.

La misma desviación, esta vez de la trayectoria de la materia ordinaria, permite explicar la generación de macroestructuras. Si una cuerda cósmica atravesara una distribución dada de polvo interestelar, las partículas que hubiera en lados opuestos de la trayectoria de la cuerda se verían, al paso de aquélla, empujadas

Formación de vortones

En un lazo circular, sin cargas ni corrientes, nos es imposible distinguir la existencia de rotaciones rígidas alrededor del eje de simetría. La sola presencia de pequeñas corrientes rompe esta simetría y marca una dirección privilegiada que permite la rotación del lazo. Esto puede también entenderse como la existencia de soluciones estacionarias de partículas en orbitales cuánticos, donde la inmensa tensión de la cuerda (que tiende a hacer colapsar el lazo) se ve compensada por el momento angular de las cargas. A aquellos lazos que se encuentran en estos estados estacionarios Davis y Shellard los apodaron en 1988 vortones.

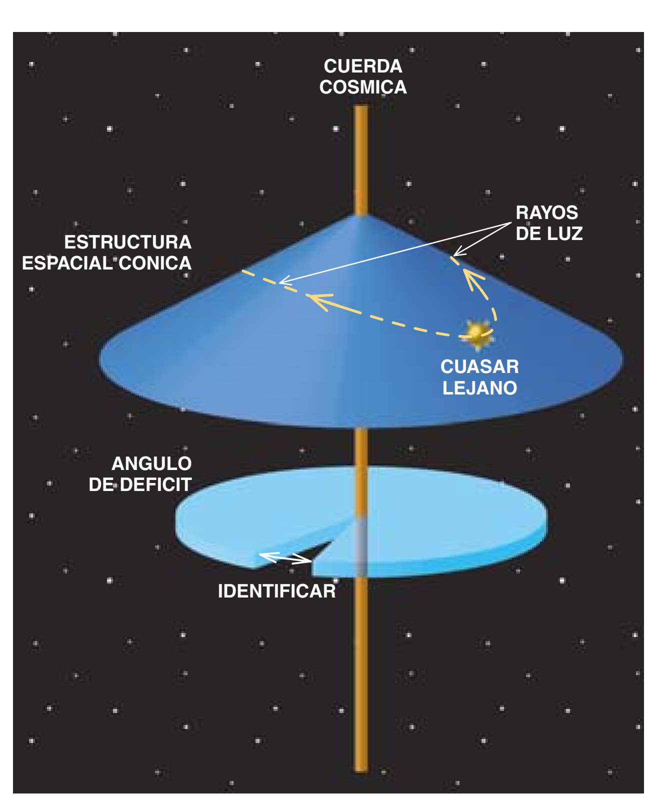
Se representa aquí el potencial de autointeracción sobre un lazo circular (anillo) de cuerda cósmica conductora. (Las unidades de los ejes son arbitrarias.) La configuración inicial se fija dando el radio del anillo, que corresponde a una masa particular. Su evolución acompaña a la del potencial; éste decrece al principio —contracción del anillo— hasta llegar al valle (*curva en negro*) en cuya base la fuerza sobre el anillo se anula. Mas, por inercia, el anillo sigue achicándose, y escalando la barrera de potencial de la izquierda, donde ahora la fuerza se opondrá a su movimiento. La barrera de potencial repulsivo lleva a la existencia de configuraciones de anillos en rotación rígida, movimiento que generará un efecto centrífugo e impedirá, en varias ocasiones, el desplome del anillo. Según la masa inicial de la configuración podemos distinguir dos casos. Primero, si la masa es menor que el valor de la energía donde el potencial (*la curva*) termina, el anillo oscilará alrededor de su posición de equilibrio, radiará parte de su exceso de energía y se estabilizará como un vortón. La segunda posibilidad es que la energía disponible inicialmente haga que el anillo se contraiga demasiado y se aproxime al límite Compton del portador de cargas donde efectos cuánticos destruirían el anillo. En este caso, la configuración se desintegrará en una ráfaga de partículas. La amplitud de las correcciones electromagnéticas promueve la disminución del número final de vortones en nuestro universo: una configuración estable (*curva negra*) correspondiente a un acoplamiento débil puede devenir inestable y colapsar si su masa inicial es demasiado grande, en el caso de acoplamientos intermedios (*curva roja*). La línea azul muestra una situación en la que la configuración se desintegrará con independencia de su masa inicial (acoplamiento electromagnético fuerte).



unas contra otras, con una velocidad relativa de varios kilómetros por segundo. A lo largo del camino recorrido por la cuerda iría quedando una estela de materia de alta densidad, que, tras comprimirse por autogravitación, engendraría las distribuciones planas de galaxias.

Esta descripción simple se complica cuando reconocemos que las cuerdas no son rectas del todo. Podemos, sin embargo, imaginarlas como una sucesión de segmentos rectos; nuestro modelo se aplica entonces sin problemas. A lo que hemos de añadir la existencia de una estructura microscópica, los latiguillos de morfología irregular. Por último, las corrientes disminuyen la tensión mecánica efectiva de la cuerda y la hacen diferir de su densidad lineal de masa.

La diferencia entre la tensión y la densidad de masa, por la presencia de corrientes eléctricas o por los latiguillos, aumenta las posibilidades de que estas cuerdas generen macroestructuras. Las cuerdas harán converger las trayectorias de las partículas y ejercerán atracción gravitatoria sobre las partículas circundantes portadoras de masa; podrían, pues, hallarse en la base no sólo de la formación de distribuciones planas de estructura, sino también de largas distribuciones filamentosas.



5. UN ESPACIO CONICO. La presencia de una cuerda cósmica modifica el espacio que la rodea. Las superficies ortogonales a la cuerda se construyen extirpando del plano un pequeño ángulo de déficit (10^{-5} radianes), y luego uniendo los bordes libres, formando superficies cónicas. Las partículas ordinarias y los fotones verán a sus geodésicas sufrir una deflexión en las proximidades de la cuerda. Este efecto podría estar detrás de las imágenes dobles de cuásares y de la formación de estelas de alta densidad de materia formadas al paso de una cuerda en movimiento.

Ante la propuesta de otros mecanismos para explicar el efecto de lente gravitatoria, la constitución de macroestructuras y la existencia de materia obscura, hemos de conocer el sello peculiar que sólo las cuerdas cósmicas pueden dejar. Nos referimos a la imagen doble de un cuásar lejano producida por una cuerda conductora. Cuando un pulso corto de corriente fluye a lo largo de la cuerda, ambas imágenes del cuásar describirán figuras simétricas aproximadamente elípticas en el cielo, que, al mismo tiempo, cambiarán de color.

Imaginemos el paso de un pulso ideal de corriente a lo largo de la cuerda. Para lograr este movimiento de las imágenes, los portadores de carga deberán desplazarse a velocidades próximas a la de la luz. En cuanto el pulso se acerca al plano imaginario formado por los rayos de las dos imágenes, éstas comienzan primero a moverse verticalmente hacia arriba y a alejarse, luego, hacia abajo para, por fin, volver a elevarse y acercarse mutuamente.

Cuando el pulso se aleja de la zona de los rayos, las imágenes ya han descrito un par de elipses en una región restringida del firmamento. Además, este movimiento durará pocos años en el caso de cuerdas de gran unificación localizadas a escasos megaparsecs de nosotros, dando tiempo suficiente para el seguimiento de la señal. (Un *parsec* corresponde a unas 100.000 veces la distancia Tierra-Sol promedio y un *megaparsec* es un millón de parsecs.) Las elipses no se cerrarán sobre sí mismas, a menos que el observador y la fuente se encuentren a igual distancia del deflector (la cuerda) durante todo el proceso, lo que es improbable.

Procuremos explicarlo. Supongamos que la cuerda está más cerca de nosotros que del cuásar. Al paso del pulso de corriente, el observador y la fuente son arrastrados hacia nuevas posiciones, pues el espacio en torno a la cuerda cambia con el paso del pulso. Ahora bien, como el observador está más cerca de la cuerda, su desplazamiento vertical será mayor. De ahí que la posición aparente de ambas imágenes finales se ubique por debajo de las iniciales y las elipses no se cierren. Sucedería el fenómeno opuesto si la fuente luminosa estuviera más cerca que nosotros de la cuerda.

Por otra parte, y debido al paso del pulso, no sólo el espacio, sino también el fluir del tiempo se ve modificado en la vecindad de la cuerda. Se resentirá la frecuencia de los fotones de la fuente (número de oscilaciones por unidad de tiempo). Al comienzo, la frecuencia disminuye con respecto a la original, luego aumenta deprisa y, al final, decrece hasta su antiguo valor, previo al paso del pulso. Este efecto es independiente de las líneas espectrales, ya sea de emisión, de átomos en tránsito desde un estado excitado a uno de energía menor, o de absorción, correspondientes a la radiación absorbida por los átomos *in situ*. Todo el espectro del cuásar deberá modificarse en coincidencia con el movimiento de la imagen doble. Distinguir estas variaciones peculiares entre otros muchos efectos irrelevantes no constituye tarea fácil. Pero si se detectara ese efecto, sería difícil rebatir la existencia de cuerdas conductoras.

La observación nos muestra la existencia de campos magnéticos en las galaxias y, en particular, en la Vía Láctea. Para explicar su presencia se invoca la evolución turbulenta de campos seminales que fluctúan al azar. Esto conduce a campos a gran escala a través de efectos magnetohidrodinámicos, en los cuales la longitud de coherencia o talla del campo magnético se incrementa en varios órdenes de magnitud. En el proceso de formación de macroestructuras, el flujo del campo magnético permanece aproximadamente constante. Aumenta, pues, la amplitud

del campo durante la compresión gravitatoria en una protogalaxia. La rotación del sistema galáctico ayuda a aumentar la fuerza del campo hasta los 10^{-6} gauss observados ahora a través del efecto de dínamo. Pero el mecanismo magnetohidrodinámico es delicadísimo. No todos le conceden capacidad para aumentar lo suficiente la longitud de coherencia del campo. ¿Cómo conseguir entonces un campo magnético que, aunque pequeño, posea la longitud de coherencia necesaria para ajustarse a los campos galácticos observados?

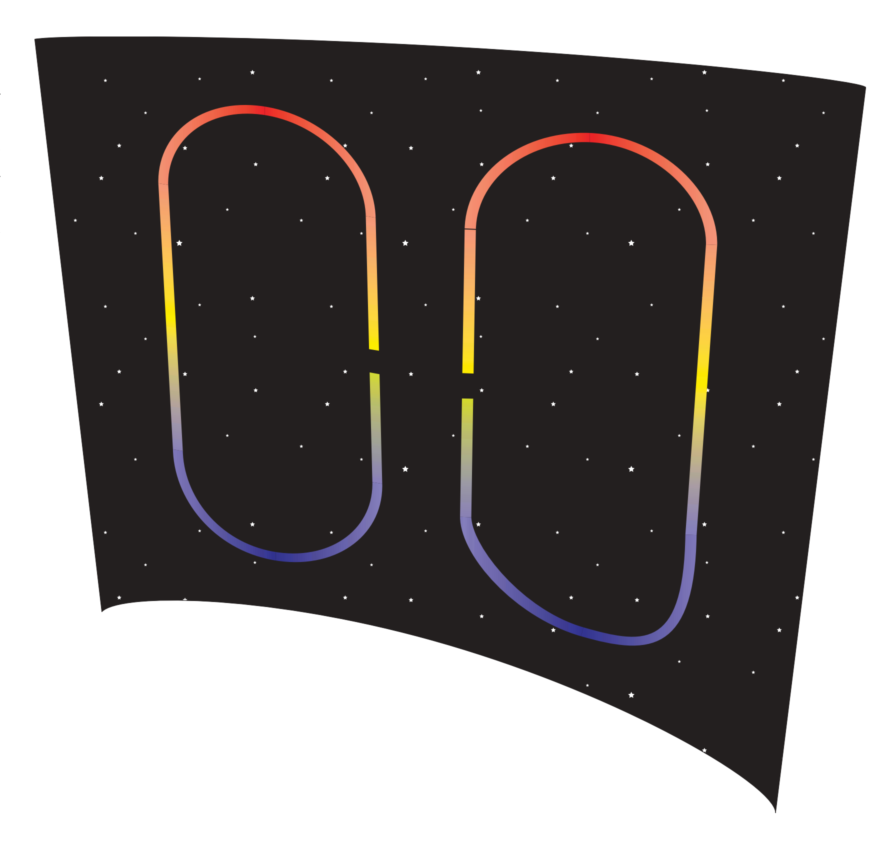
Las cuerdas cósmicas conductoras transportan corrientes eléctricas de enorme intensidad. En 1985, Edward Witten, de Princeton, estimó la corriente máxima proporcional a la masa del portador fermiónico de cargas en la cuerda. En el caso de tratarse de un electrón, esta corriente rondaría las decenas de ampères. Pero si fueran partículas de gran unificación podrían alcanzarse corrientes de hasta 10^{20} ampères, algo espectacular incluso para los estándares astrofísicos.

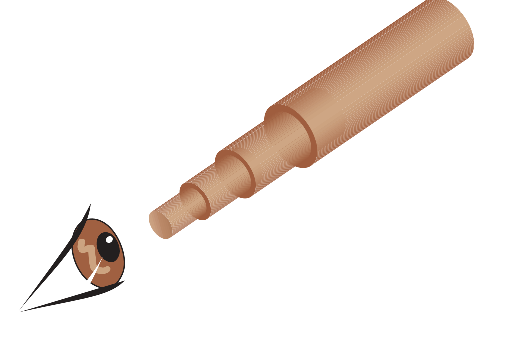
Para producir campos magnéticos precisamos objetos dotados de carga eléctrica que se mueven por el espacio. Y eso es lo que son y hacen las cuerdas conductoras. Se calcula que los valores de los campos magnéticos generados por éstas se cifran en torno a 10^{-20} gauss a escalas protogalácticas de 100 kiloparsecs; el efecto dínamo aumentaría luego la intensidad del campo hasta los valores observados hoy.

Con las cuerdas conductoras podrían además guardar relación los rayos cósmicos. La atmósfera terrestre sufre el continuo bombardeo de partículas procedentes del espacio exterior. Esa lluvia de fotones, electrones, protones y núcleos pesados responde a la denominación colectiva de rayos cósmicos. Se han registrado episodios de este tipo con energías altísimas, del orden de cientos de exaelectronvolts (‘exa’ = 10^{18}), lo que corresponde a la energía cinética de una pelota de tenis con una velocidad de 200 km/h (y toda esta energía concentrada en una partícula atómica).

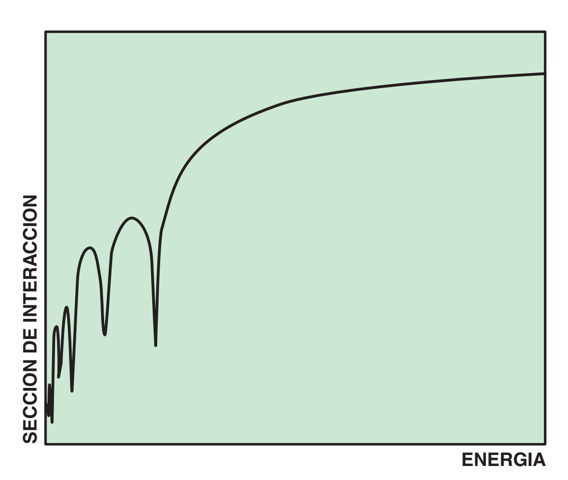
Lejos de estar vacío, el espacio intergaláctico se halla ocupado por fondos cósmicos de radiación electromagnética, como el fondo de ondas radio y el de microondas. Para estos rayos cósmicos de tan alta energía, los fondos deben parecerse a un puñado de fotones energéticos. Por encima de una velocidad crítica, una partícula cualquiera vería su energía degradada a través de interacciones con estos fotones: por ejemplo, los protones que alcanzaran nuestra atmósfera con la energía necesaria para explicar estos episodios energéticos no sobrevivirían en un recorrido superior a 30 megaparsecs; éste es el límite GZK (de Greisen-Zatsepin-Kuzmin). ¿Cómo explicar estos episodios? Los orígenes de estos rayos cósmicos deberían hallarse cerca (en el sentido astrofísico) de nuestra galaxia. Pero, en la dirección de donde provienen, todas aquellas fuentes posibles como cuásares o galaxias activas se encuentran demasiado lejos.

¿Cuál es la identidad de estos rayos cósmicos tan energéticos? ¿Cómo llegan hasta nosotros? La astrofísica no sólo carece de respuestas, sino que afirma que no deberíamos recibir tales rayos. En ese momento, los defectos topológicos, y en particular las cuerdas conductoras, entran en escena. Ofrecen dos formas de enviarnos partículas energéticas. La primera es por emisión de partículas de gran unificación a energías altísimas a partir de *cusps* de las





6. EFECTO DE LENTE GRAVITATORIA CON CUERDAS CONDUCTORAS. La detección indirecta de una cuerda cósmica conductora podría venir de la observación del movimiento peculiar de una imagen doble. En situaciones reales la doble imagen abarcaría unos pocos segundos de arco. Si una cuerda conductora, dispuesta verticalmente, por simplicidad, pasara entre nosotros y un cuásar lejano, las imágenes aparentes de éste describirían elipses aproximadas. Al mismo tiempo estas imágenes cambiarían lentamente su color (en la figura este cambio fue exagerado un millón de veces). Tal combinación de efectos constituiría una pista inconfundible en la búsqueda de cuerdas cósmicas conductoras.



7. ESPECTRO DE INTERACCION de vortones en la atmósfera. Variación de la sección de interacción (en unidades logarítmicas arbitrarias) entre un vortón y un protón atmosférico, en función de la energía de interacción. Los diferentes niveles de energía —líneas de excitación— reflejan la presencia de estados ligados internos de partículas portadoras de carga. La detección de episodios de este tipo favorecería la hipótesis que atribuye a los vortones el origen de los rayos cósmicos de ultraalta energía.

cuerdas; por tanto, no precisan aceleración alguna. La segunda posibilidad, de mayor interés, es que se trate de lazos estables de cuerdas conductoras, confundidas con partículas ordinarias.

Ambas posibilidades son muy atractivas. La situación podría aclararse en un futuro cercano con la construcción del observatorio Pierre Auger. Los detectores comenzarían a operar a principios del siglo que viene y su estadística será tal, que nos permitirá leer la identidad de los rayos de ultraalta energía a partir de los datos.

¿Cómo funcionan estos dos mecanismos de producción de rayos cósmicos? Las cuerdas conductoras transportan corrientes, partículas atrapadas en su interior, dotadas de ingente masa e inestables. Ahora bien, a imagen de lo que sucede con los neutrones, que son estables en el interior del núcleo y se desintegran en pocos minutos fuera del mismo, estas partículas pesadas exhiben un comportamiento similar cuando se las expulsa fuera de la cuerda. En su evolución, las cuerdas cósmicas sufren episodios violentos; a veces se pliegan, otras se entrecruzan e intercambian cabos. En cualquiera de estos episodios, algunas partículas atrapadas en la cuerda logran escapar y, ya en el exterior, se desintegran. Puesto que tales partículas presentan una masa mucho mayor que cualquier otra actual, las partículas en las que se desintegran serán extremadamente energéticas, de acuerdo con la ecuación de Einstein $E = mc^2$ sobre la equivalencia de masa y energía.

Vayamos ahora con la segunda posibilidad: la de que hubiera una gran población de cuerdas con energías menos elevadas. En tal situación, podrían haber sobrevivido lazos diminutos de baja energía, como los vortones. Su número podría constituir un porcentaje importante de la masa crítica del universo. Los vortones, cuya carga centuplica la carga eléctrica del electrón, experimentarían una más fácil aceleración a lo largo de las líneas de campo eléctrico en los núcleos galácticos activos. En razón de su masa ingente, se requieren velocidades mucho menores (comparadas con la de los protones) para alcanzar energías equivalentes. Los vortones podrían cubrir en su viaje enormes distancias sin ser alterados por el límite GZK.

Bastaría con que un vortón colisionara con una molécula cualquiera de la atmósfera terrestre para desintegrarse y reputarse por una partícula energética ordinaria. Además, la interacción entre los portadores de carga del interior del vortón y los quarks que forman los protones atmosféricos generaría un espectro característico de líneas, seguido de un continuo, revelador de la ionización. Se estima en aproximadamente una parte en 10^5 la probabilidad de que un vortón interaccione con la atmósfera; por tanto, de ser vortones los rayos cósmicos de ultraalta energía, se esperarían importantes cadenas horizontales de episodios, adecuadas para una red extensa de detectores como por ejemplo el Observatorio Auger.

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

COSMIC STRINGS AND OTHER TOPOLOGICAL DEFECTS, P. Shellard y A. Vilenkin, Cambridge University Press, 1994.

EL MOMENTO DE LA CREACIÓN, James S. Trefil, Biblioteca Científica Salvat, Salvat Editores S. A.; Barcelona, 1986.

TALLER Y LABORATORIO

Shawn Carlson

Formaciones cristalinas en el microscopio

Los lectores conocen mi afición al microscopio. Con un Spencer zarandeado he pasado largas horas de vagabundeo por majestuosos lechos de algas microscópicas y bosques flotantes de fitoplancton. Nunca había caído en la cuenta de lo que ofrecería si lo aplicaba al crecimiento de los cristales.

Suele bastar con licuar alguna sustancia bajo el objetivo y luego dejarla solidificar. Se requiere cierto calentamiento de las platinas de los microscopios. He tanteado con algunas combinaciones, pero nunca conseguí un control fino de la temperatura ni un calentamiento uniforme. Por ello me agradó sobremanera recibir una idea innovadora de Ely Silk, que vive en Tamarac (Florida). Si sabemos aplicarla, crearemos unas sorprendentes imágenes de los cristales.

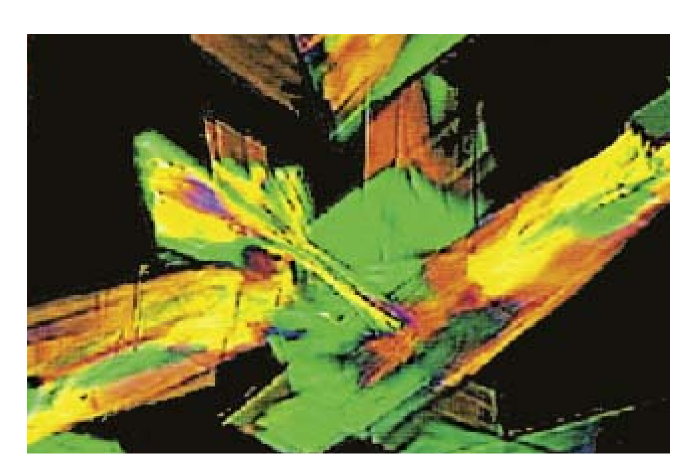
Silk construyó su calentador valiéndose del mismo vidrio electroconductor que los fabricantes de automóviles emplean en las ventanillas descongelables. Ese vidrio lleva una capa, fina y transparente, de óxido de estaño o de óxido de indio y estaño. La corriente eléctrica que atraviese esa capa puede caldear el vidrio hasta temperaturas superiores al punto de ebullición del agua. (Aunque Silk ha desarrollado por su cuenta la idea de emplear vidrio conductor, en el número de 1984 de la revista *Microscope* A. Skirius describía un sistema similar.) Me apresuro a confesar mi incapacidad por dar con una fuente barata de material. Por ello he adquirido y cortado a trozos una lámina de gran tamaño con el ánimo de ponerlos a disposición de la Society for Amateur Scientists.

Una vez sujeto el vidrio, hay que prepararlo para que admita la corriente eléctrica. Silk formó dos electrodos mediante sendas tiras finas de cobre de unos 3 mm de ancho, tiras que pueden cortarse de una lámina de pan de cobre, de venta en hojalaterías. Colocaremos el vidrio con la capa de óxido hacia arriba; péguense los electrodos junto a los cantos izquierdo y derecho con una epoxia metalizada, que a diferencia de la mayoría de los adhesivos deja pasar la electricidad. Las ferreterías tienen resinas con polvo de plata o aluminio.

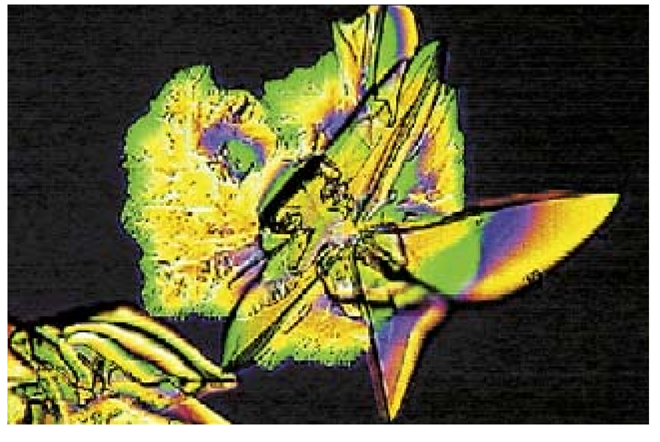
Se procede luego a la protección de la capa de óxido, para evitar que se arañe al exponer la muestra al calor. Silk puso una gota de glicerina en el centro de la cara del óxido de la platina y la tapó con un cubreobjetos de poco espesor, aunque ancho. Si no se dispone de glicerina, servirá cualquier fluido de alto punto de ebullición; por ejemplo, líquido de radiador o de frenos o aceite de motor. Silk recomienda cubreobjetos del número 0 (el más fino) que mide 22 por 30 milímetros, aunque valen casi los de cualquier medida. Con este preparativo, la muestra reaccionará rápidamente a todos los ajustes de la intensidad de caldeo.

El objeto a estudiar se pone encima del cubreobjetos, protegido con una placa cuadrada de vidrio de 18 mm de lado. Para facilitar el manejo, esa placa superior debe ser de un número más alto, el uno o el 2. Fisher Science Education, de Burr Ridge (Illinois), vende a un precio accesible juegos de cubreobjetos en cajas de 100 (número de artículo CQS17525A).

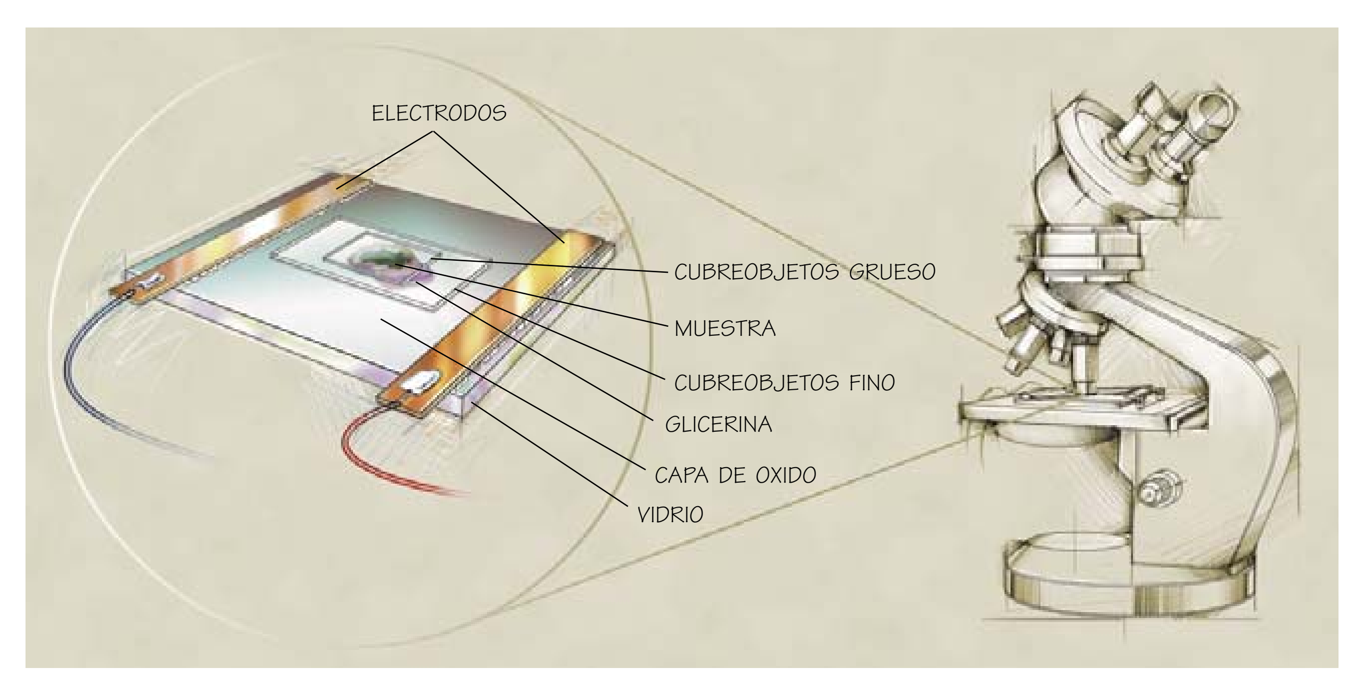
Se conectan, por último, los electrodos a una fuente de alimentación capaz de suministrar una corriente de suficiente intensidad. Silk empleó una fuente variable de 15 volts y 1 ampère de CA o CC. Es fácil encontrar una de esas fuentes en cualquier tienda de saldos de artículos de electrónica. (Quizá sea necesario envolver parcialmente la platina en material aislante, tal como papel de periódico.) O puede rebuscarse entre



1. El ácido mirístico y la trimiristina mezclados cristalizan en láminas planas. Estas imágenes se tomaron con una lente de 180 aumentos bajo luz polarizada



2. El naftaleno produce cristales que pueden hacerse crecer desde el tamaño de un grano de arena aplicando calor y condensando los vapores en un portaobjetos



3. La platina de microscopio caldeada emplea el mismo tipo de vidrio que muchos de los descongeladores de ventanilla de automóvil. La cara del vidrio con la capa de óxido conductor se pone boca arriba. La glicerina protege el óxido; los cubreobjetos de vidrio encierran la muestra

las existencias de comerciantes de mercadillos y rastros. Silk dice poder calentar la platina hasta los 100 grados Celsius. Por supuesto, nunca hay que dejar la platina desatendida con la corriente dada.

Con un juego de filtros polarizadores conseguiremos bellas imágenes polícromas. Los filtros actúan sobre la naturaleza electromagnética de la luz dejando pasar sólo la energía cuyo campo eléctrico resida en la dirección del eje de polarización del filtro. Un filtro doble construido rotando dos polarizadores para que sus ejes sean perpendiculares, bloquea toda la luz. Y por raro que parezca, añadiendo un tercer filtro entre ellos puede hacerse que la luz vuelva a ser transmitida. Parte de la luz atraviesa el filtro añadido, porque el eje de polarización de éste no forma ángulo recto con el eje del primer filtro. Y cualquiera que sea la luz que atraviese el dispositivo, la misma debe estar alineada con el eje del filtro intermedio. Así es porque ese filtro rota el campo eléctrico. Por tanto, cuando la luz rotada llega al filtro final, parte de ella podrá atravesarlo.

La mayoría de los cristales polarizan también la luz a causa de la muy favorable ordenación de sus átomos. Por lo general, todo cristal polariza las diversas longitudes de onda con eficacia dispar; así, unos colores lo atraviesan con intensidad mayor que otros. Para captar este efecto en una película, colóquese un filtro polarizador encima de la fuente luminosa y móntese otro en el objetivo del microscopio. Las tiendas de artículos científicos disponen de esos filtros. Fisher Science Education vende el material que permite construir ambos e incluso añade materiales cristalinos para su estudio (número de artículo CQS19709-3). También puede experimentarse con filtros propios. Edmund Scientific, de Barrington (Nueva Jersey), dispone de láminas finas de plástico de gran calidad polarizante (número de catálogo H43781).

Para estudiar la cristalización, colóquese en la platina una sustancia con un punto de fusión mayor que la temperatura ambiente y menor que 100 ºC. Ajustando la fuente de alimentación para que mantenga la temperatura de la platina cercana al punto de fusión de la sustancia, podremos crear y destruir, de modo alterno, los cristales haciendo pequeños ajustes de corriente. Este experimento resulta más placentero que la mera observación de la formación de cristales salinos por evaporación, en que sólo es posible ver una vez esos cristales antes de limpiar y reacondicionar la platina.

Hay múltiples sustancias que pueden fundirse sin peligro en la platina. Silk recomienda timol, alcanfor, mentol, ácido esteárico, trimistirina y ácido mirístico. Puede obtenerse una mezcla de trimistirina y ácido mirístico poniendo nuez moscada en remojo en metanol y filtrando y evaporando después el solvente. En su mayoría, las demás sustancias se expenden en farmacias o droguerías.

Andemos con precaución. Ciertos compuestos, tales como el naftaleno (en tiempos, componente activo de las bolas antipolilla), emiten en caliente gases nocivos. (Los antipolillas modernos suelen emplear paradiclorobenceno, que, aunque calificado de irritante, no se considera tóxico para las personas, y sus cristales brindan un estudio delicioso.) Nunca se experimentará con algo salvo que se sepa que no es peligroso o se esté seguro de que nadie corre riesgo alguno de emanaciones tóxicas. Los buenos experimentadores pueden centrarse en discurrir un procedimiento que hermetice la célula o que ventile los vapores. Un célula hermética podría emplearse para incubar organismos termofílicos. Les invito a hacernos partícipes de sus ideas en la pertinente área de debate de la página Web de la Society for Amateur Scientists.

La Society for Amateur Scientists puede facilitar el vidrio conductor para este proyecto. Para hacer un pedido, llame al 619-239.88.07 o escriba a 4735 Clairemont Square, Suite 179, San Diego, CA 92117. Para más información acerca de este y otros proyectos de esta sección, visite la página Web de la Society for Amateur Scientists en www.thesphere.com/SAS/WebX.cgi.

Juegos matemáticos

Ian Stewart

Piratas en apuros

A veces, los razonamientos lógicos conducen a conclusiones en apariencia estrafalarias. En tales casos, la norma es que si el razonamiento no tiene fallos, las conclusiones son correctas, aunque puedan entrar en conflicto con la intuición. En septiembre de 1998, Stephen M. Omohundro me envió un problema que pertenece a esta categoría. Aunque el problema ya se conocía, Omohundro ha dado con una variante en la que el razonamiento se vuelve sorprendentemente enrevesado. Veamos, primero, la versión original. Diez piratas han logrado apoderarse de un botín de 100 piezas de oro, y quieren repartírselo. Acostumbran efectuar tales repartos de esta guisa: el pirata más feroz hace una propuesta de reparto, que es votada por todos, incluido el proponente. Si el 50 %, o más, vota a favor, la propuesta es aprobada. En caso contrario, el proponente es arrojado por la borda; el procedimiento es repetido por el pirata que le siga en ferocidad.

¿Qué reparto debería proponer el pirata más feroz para lograr el máximo de oro? Por comodidad, numeremos a los piratas en orden de ferocidad creciente. El espejo de mansedumbre será el número 1, el siguiente, un poco más fiero, el número 2, y así sucesivamente. Al pirata ferocísimo se le asigna, pues, el número más alto, y las propuestas se hacen en orden inverso, del más feroz al menos violento.

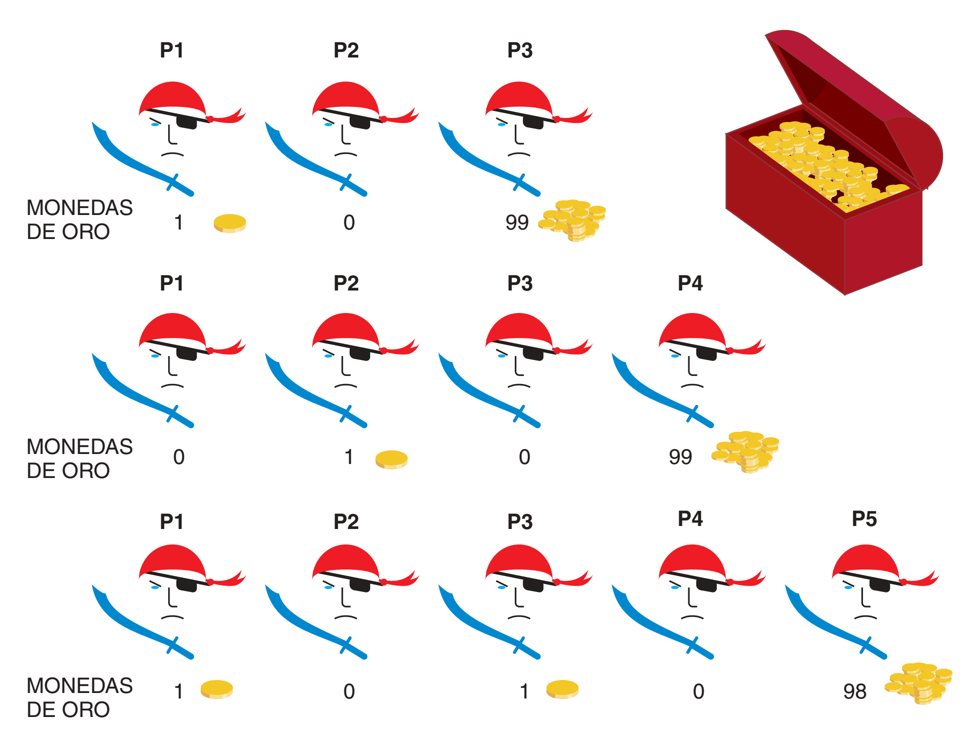
El secreto para analizar todos estos juegos de estrategia consiste en proceder por retrogradación desde el final. Llegado el último caso, se sabe con certeza qué decisiones son buenas y cuáles malas. Establecidas éstas, se puede transferir ese conocimiento a la penúltima decisión, y así sucesivamente. Si se razona desde el principio, en el mismo orden en que las decisiones son realmente tomadas, no se llega muy lejos. El motivo es que las decisiones estratégicas conciernen todas a "¿Qué hará el siguiente si yo hago esto?". Por tanto, las decisiones siguientes a la nuestra son las verdaderamente importantes; pero no las anteriores a la nuestra, pues nada podemos hacer para influir en ellas.

Habida cuenta de lo anterior, el análisis del juego debe empezar en el punto en que sólo quedan dos piratas, P1 y P2. En este punto, el pirata más feroz es P2, y su decisión óptima es obvia: propone 100 piezas de oro para él, y ninguna para P1. Su propio voto representa ya el 50 % y su propuesta es aprobada.

Introduzcamos ahora el pirata P3. El pirata P1 sabe —y P3 sabe que P1 lo sabe— que si su propuesta fuera rechazada, el juego proseguiría hasta la fase de dos piratas, y P1 no recibiría nada. Así pues, P1 votará a favor de cualquier cosa que P3 proponga, con tal que le suponga recibir algo. P3 utiliza el mínimo oro posible para comprar el voto de P1, lo que origina la siguiente propuesta: 99 monedas para P3, 0 para P2 y 1 moneda para P1.

La estrategia de P4 es parecida. Para ganar, necesita el 50 por ciento de los votos; le basta con el apoyo de otro pirata. El mínimo soborno que puede ofrecer es una pieza de oro, que puede conceder a P2, porque P2 se quedará sin nada si se rechaza la propuesta de P4 y la de P3 se aprueba. Por tanto, la propuesta de P4 es 99 monedas para él, 0 para P3, 1 para P2, y 0 para P1. El análisis de P5 es, sin embargo, ligeramente diferente; ha de sobornar a *dos* piratas para lograr una votación favorable. El soborno mínimo que es de dos monedas de oro, y la única forma de que pueda tener éxito con un tal soborno es proponer 98 piezas de oro para sí mismo, 0 para P4, 1 para P3, 0 para P2, y 1 para P1.

El análisis prosigue de igual modo, con cada propuesta determinada unívocamente por la condición de dar al proponente la máxima recompensa, al tiempo que le asegura una votación favorable. Siguiendo esta regla, P10 propondrá 96 piezas de oro para sí mismo, una moneda para cada uno de los piratas P8, P6, P4 y P2, y ninguna para los piratas de numeración impar.



1. Los piratas más feroces se llevan la parte del león cuando se reparte el botín entre grupos de tres, cuatro o cinco corsarios

Posibles receptores de una moneda de oro

202 PIRATAS

P1	P2	P3	P4........	P197	P198	P199	P200	P201	P202
NO	SI	NO	SI........	NO	SI	NO	SI	SI	NO

204 PIRATAS

P1	P2	P3	P4........	P197	P198	P199	P200	P201	P202	P203	P204
SI	NO	SI	NO........	SI	NO	SI	NO	NO	SI	NO	NO

2. En grupos más numerosos el pirata más feroz ha de sobornar a 100 de sus compañeros, ofreciendo una moneda a cada uno

Esta distribución resuelve la versión del problema correspondiente al caso de 10 piratas.

La contribución de Omohundro consiste en plantear la misma cuestión, pero siendo ahora 500 los piratas que han de repartirse las 100 piezas. La misma regla es válida hasta el pirata número 200. P200 no les ofrecerá nada a los de numeración impar, desde P1 hasta P199, y les prometerá una pieza de oro a piratas pares, desde P2 a P198, dejando una moneda para sí. A primera vista, el razonamiento se rompe a partir de P200, porque a P201 se le han agotado los sobornos. No obstante, P201 tiene todavía interés en no ser arrojado por la borda, por lo que puede proponer no tomar nada para sí y ofrecer una pieza de oro a cada uno de los piratas de numeración impar, desde P1 hasta P199.

También el pirata P202 se ve obligado a no pedir nada: tiene que usar las 100 monedas para sobornar a 100 piratas, y los receptores han de figurar entre quienes no recibirían nada con la propuesta de P201. Dado que hay 101 de tales piratas, la propuesta de P202 ya no queda determinada de modo único: hay 101 formas de repartir los sobornos. En la figura 2 podemos ver los 101 piratas que *podrían* recibir algo con la propuesta de P202, y los 101 que definitivamente no van a recibir nada.

El pirata P203 ha de conseguir 102 votos favorables, contado el suyo. Pero no tiene efectivo suficiente para sobornar a 101 de sus "colegas". Así pues, P203 habrá de saltar por la borda, proponga lo que proponga. Mas, aunque P203 haya de pasear por la plancha, eso no quiere decir que quede al margen del proceso. Por el contrario, P204 sabe ahora que la única aspiración de P203 en la vida es no verse obligado a proponer un reparto de los despojos. Así pues, P204 puede contar con el voto de P203, cualquiera que sea la propuesta que formule P204. Ahora, P204 llega justito a casa: puede contar con su propio voto, con el voto de P203 y con 100 votos comprados con una moneda cada uno; 102 votos en total, el 50 por ciento necesario. Los receptores de los sobornos han de contarse entre los 101 piratas que decididamente nada iban a recibir con la propuesta de P202.

¿Y qué le sucede a P205? ¡Que no es tan afortunado! No puede contar con los votos de P203 y P204: si éstos votan en su contra, podrán disfrutar echándole al agua y lograr todavía salvarse a sí mismos. Así pues, P205 será arrojado al mar, proponga lo que proponga. Y otro tanto le ocurre a P206; puede contar con el voto de P205, pero eso no basta. Análogamente, P207 necesita 104 votos: 3 además del suyo y de los 100 de los sobornos. Puede lograr los votos de P205 y P206; precisa uno más, y no hay ninguno disponible. Así que P207 tiene que desfilar por la plancha.

P208, más afortunado, necesita 104 votos, ¡pero P205, P206 y P207 van a votar a su favor! Si añade su propio voto y los 100 de los sobornos, podrá seguir en el negocio. Los receptores de sus sobornos han de hallarse entre quienes no conseguirían nada con la propuesta de P204: los piratas de numeración par, de P2 hasta P200, P201, P203 y P204.

Ha quedado establecida ahora una nueva regularidad, que continúa indefinidamente. Los piratas que pueden hacer propuestas victoriosas (consistentes siempre en no darse nada a sí mismos y en sobornar a 100 de sus camaradas) se encuentran separados unos de otros por tramos cada vez más largos de piratas que serán arrojados por la borda, cualquiera que sea la propuesta que hagan, y cuyo voto está asegurado para cualquier propuesta de un pirata más feroz. Los piratas que logran evitar tal suerte son P201, P202, P204, P208, P216, P232, P264, P328, P456 y así sucesivamente: piratas cuyo número es igual a 200 más una potencia de 2.

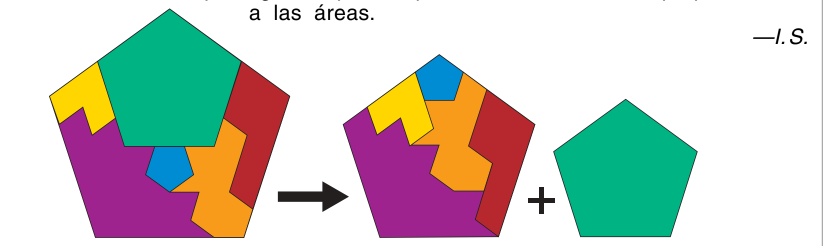
Tenemos que decidir ahora quiénes serán los afortunados piratas que reciban los sobornos, con el fin de asegurarnos de que los aceptarán. La solución no es única. Una de las formas de hacerlo es que P201 le ofrezca sobornos a los piratas de numeración impar P1 a P199, que P202 le ofrezca los sobornos a los piratas pares P2 a P200, después P204 a los números impares, P208 a los pares, y así sucesivamente, alternando de par a impar, y viceversa.

Se llega a la conclusión de que con 500 piratas y la estrategia óptima, los primeros 44 piratas son arrojados por la borda, y después P456 le ofrece una pieza de oro a cada uno de los piratas de numeración impar P1 a P199. Gracias a su sistema democrático, los piratas han organizado sus asuntos de modo que los más feroces son en su mayor parte arrojados al mar. Sólo los 200 piratas menos malvados tienen oportunidad de conseguir salvarse, y sólo la mitad de éstos llegarán a recibir una moneda de oro.

Acuse de recibo

En respuesta al artículo sobre disecciones ["Rompecabezas dobles", diciembre de 1997], Gil Lamb, del Principado de Andorra, me ha enviado una descomposición del pentágono (*abajo*) que proporciona una ingeniosa demostración de la relación pitagórica $3^2 + 4^2 = 5^2$. Los números representan las longitudes de los lados de los pentágonos, por lo que sus cuadrados son proporcionales a las áreas.

—*I. S.*





NEXOS

James Burke

Entente cordiale

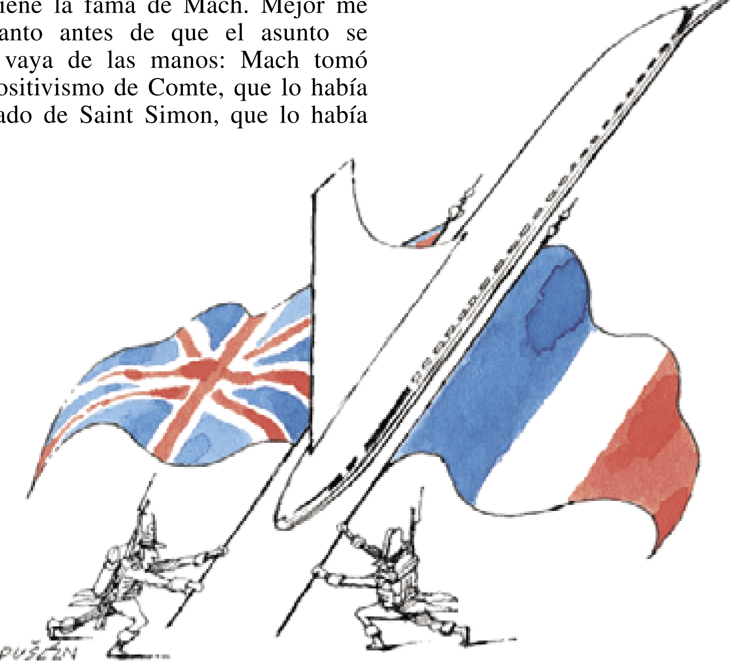
Me enteré hace apenas una semana de que al SST anglofrancés se le impuso el nombre de Concorde para sellar la fase de buenas relaciones entre ambos lados del Canal. Sucedía esto a sesenta mil pies sobre el Atlántico, mientras volábamos a mach dos y el pasaje dormitaba aburrido.

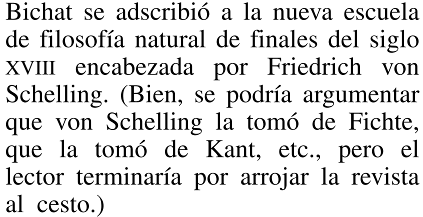
Si dejamos de lado el valor mach que aparecía en la pantalla frontal, ante la cabina, no recuerdo ninguna sensación supersónica. Lo predijo el propio Ernst Mach a finales del siglo XIX, cuando convenció a unos cuantos de que dieran vueltas, encapuchados con una bolsa de papel para así investigar la adaptación a la aceleración. Tras un vértigo inicial, los canales semicirculares se adaptaron.

Considerados los logros de Mach, parece injusto que no goce de la prensa de que disfruta Einstein. Sin ir más lejos, se ocupó de la gravedad mucho antes que éste. Para Mach no existían absolutos, sólo marcos de referencia, porque la percepción (recuérdese el experimento de la bolsa de papel) era un fenómeno subjetivo. Este modo de pensar, núcleo del Positivismo, creó escuela. No pocos creen que Mach la fundó en Viena. Por ello Auguste Comte, un curioso filósofo francés (que se tiró de un puente, se casó con una prostituta y fundó la sociología), no tiene la fama de Mach. Mejor me adelanto antes de que el asunto se nos vaya de las manos: Mach tomó el positivismo de Comte, que lo había tomado de Saint Simon, que lo había tomado de Condillac, que lo había tomado de Locke, que...

En cualquier caso, Comte enunció que la finalidad de la ciencia estribaba en la predicción y dividió a la historia en tres eras: todo se refiere a dioses, todo se refiere a fuerzas misteriosas y todo se refiere a leyes naturales que formularemos cuando hayamos desarrollado las matemáticas oportunas. Comte esbozó también la física social, la manera de predecir el comportamiento y facilitar la vida de los topógrafos, planificadores o políticos. Otra cosa que Comte conocía positivamente era la "ciencia general de la vida" desarrollada por Marie François-Xavier Bichat. Bichat hirvió, secó, frió, horneó, estofó, remojó y, en general, aplicó el arte culinario de la reducción a fragmentos animales y humanos. Distinguió veintiún tipos diferentes de tejido; señalaba que, como cada uno presentaba diferentes propiedades, cada tejido debería padecer enfermedades distintas. ¿Se busca la causa de una muerte? *Cherchez la tissue*. Afortunadamente para los seguidores de "Colombo" y los forenses, el afán de Bichat se empezó a conocer como anatomía patológica.

Por supuesto, esta aproximación fisiológica de Bichat no lo era tanto.





Bichat se adscribió a la nueva escuela de filosofía natural de finales del siglo XVIII encabezada por Friedrich von Schelling. (Bien, se podría argumentar que von Schelling la tomó de Fichte, que la tomó de Kant, etc., pero el lector terminaría por arrojar la revista al cesto.)

La filosofía natural manejaba la idea de una gran teoría unificada antes de la gran teoría de unificación de nuestros físicos teóricos. Postulaba la existencia de un sustrato fundamental del que todo estaba hecho (como el tejido de Bichat, razón por la cual von Schelling lo persiguió). En 1797, von Schelling también dio cierto empuje al romanticismo, con la idea de que toda la naturaleza se basaba en opuestos: polos magnéticos norte y sur, ácido y base, caliente y frío, y así. Consideraba que los procesos de la vida se basaban en la constante lucha entre opuestos. De ello se derivaría "una unificación en un plano más elevado". Este tipo de bla, bla hizo a los pensadores ilustrados de última hornada tirarse de los pelos.

Pero no a un danés aprendiz de fabricante de pelucas, Hans Christian Oersted, quien lógicamente se licenció en farmacia y luego se interesó sobremanera por el tema romántico del conflicto en la naturaleza. Razonando sobre la naturaleza magnética de la electricidad y su conflicto positivo-negativo, se le ocurrió que se podría crear un conflicto tal, que al pasar corriente por un alambre muy fino creara un campo magnético. Oersted lo consiguió en 1820. Cinco años después, un zapatero inglés, William Sturgeon, enrolló un cable con corriente alrededor de una barra de hierro imantado; el campo magnético resultante fue tan intenso, que desplazó los objetos. Igual que se mueve la llave receptora de un telégrafo cuando la línea transmite impulsos eléctricos. No está mal para un zapatero.

La obsesión electromagnética de Sturgeon (¿cómo llamar si no a las quinientas repeticiones de la cometa de Benjamin Franklin en el experimento con una tormenta de rayos?) lo llevó a obtener una plaza como profesor de la Real Escuela Militar de la Compañía

de las Indias Orientales, gracias a la mediación del docente de matemáticas de la escuela, Samuel H. Christie. El padre de Christie había fundado la sala de subastas Christie's y tal vez por ello Sam fuera gran amigo de Sir Joshua Reynolds. Sir Joshua, no se nos escape, era un pez gordo en el mundo del arte: presidente de la Real Academia, amigo del rey y extraordinario retratista. Entre sus retratos se incluye el de una joven suiza, con la que, según parece, llegó a tener algo. Se trata de una vieja conocida: Angelica Kauffmann, muy celebrada en Londres allá por 1770. Ella también pintaba, pero más casas que personas.

Kauffmann pasó unos cuantos meses formándose en Roma, en compañía de Johann Winckelmann, el inventor de la historia del arte y de la estética —y todo lo que una joven bien educada realiza entre el colegio y el matrimonio—. Fue Winckelmann quien convenció a Europa para que acudiera a Pompeya, Herculano y compañía. Desenterradas, podía uno sumergirse en el siglo I d.C. y vivir el arte clásico. Otros, como Giambattista Piranesi, se dedicaban a dibujar ruina tras ruina. Piranesi mostró su obra al arquitecto escocés Robert Adam, quien, al regresar a su país, convirtió las insípidas mansiones británicas en coquetas villas griegas y romanas, con accesorios incluidos, algunos de los cuales realizó Kauffmann.

Adam encargó algo vagamente metálico a Matthew Boulton, que disponía de toda suerte de cizallas y máquinas de impresión en su fábrica de Birmingham. Otra ocupación absorbente era hacerle la vida imposible a James Watt. Boulton había empezado fabricando hebillas para zapatos, una idea bastante acertada antes de la era de los lazos. Sin un pelo de tonto, se introdujo también en la emisión de moneda mediante máquinas de vapor (gracias, James), justo en un momento en el que en Inglaterra se planteaba un tipo nuevo de acuñamiento. En 1797 recibió dos encargos: fabricar las nuevas monedas de cobre británicas y organizar una nueva Casa de la Moneda en la Torre de Londres, que ahorró mucho gasto gracias a las nuevas máquinas de Boulton, capaces de acuñar doscientas monedas por minuto con la asistencia de una sola persona.

La llegada de las máquinas de vapor permitió afinar el detalle. El cambio estimuló un diseño más artístico. En 1817 el responsable del Tesoro contrató al italiano Benedetto Pistrucci, quien colocó a San Jorge y al Dragón sobre las insignias reales. Pistrucci se mostraba muy diestro en sus diseños gracias a una nueva máquina de reducción pantógrafa que le permitía reproducir el menor detalle. En una ocasión incluso su propio nombre completo, en lugar de las habituales iniciales. Esta falta de elegancia y el ser extranjero hicieron que nunca obtuviera el puesto de grabador jefe que merecía.

Unos años antes de su muerte, ocurrida en 1855, Pistrucci entregó sus diseños para el medallón que debía conmemorar la batalla de Waterloo. Esa circunstancia dañó tanto las relaciones anglofrancesas, que los gestos de cortesía y maquillaje durarían más de cien años después, como lo fue ponerle al SST un nombre francés: Concorde.

Libros

Genética

Reivindicativa

Rosalind Franklin y el ADN, por Anne Sayre. Editorial Horas y Horas; Madrid, 1997.

La dilucidación de la estructura del ADN marcó un hito en la genética moderna, el nacimiento de la genética molecular, y es sin duda uno de los descubrimientos más importantes de este siglo. Los alumnos sabrían que esto ocurrió en Cambridge en 1953 y que sus autores, James Watson y Francis Crick, recibieron el galardón científico más apreciado, el premio Nobel, en 1961. Sin embargo, los entresijos de la historia son más complejos y mucho más desconocidos. Los que están interesados directamente en la historia de este gran logro científico saben que además de las interesantes charlas en el "pub" y las brillantes disquisiciones de Crick, que tan amenamente describe Watson en *La doble hélice*, ocurrieron otras muchas cosas que no embellecerían el relato.

El papel de Rosalind Franklin en esta historia es claramente la del perdedor, incrementado aún más por su fallecimiento prematuro en 1958, víctima de un cáncer. Nadie duda hoy que los datos que ella obtuvo sobre los cristales de ADN y que su compañero Wilkins facilitó al grupo de Cambridge, sin que ella lo hubiera autorizado, fueron esenciales para establecer el modelo de la doble hélice. En este libro Anne Sayre reivindica con una prosa elegante y amena su importante participación en el descubrimiento y trata de borrar la imagen de mujer dura, frustrada y obcecada que Watson le otorgó. Cuando Anne Sayre publicó el libro en 1975, siete años más tarde que el de Watson, aún no se habían borrado los comentarios de los implicados y del resto de la comunidad científica y éste tenía claramente un valor reivindicativo. Hoy, veinticuatro años más tarde, la publicación de la traducción es más difícil de justificar.

Rosalind demostró sobradamente que no sólo era valiente, sino inteligente, coherente y resolutiva. Lejos de admitir que la mujer ha alcanzado una posición de igualdad, probablemente sea en el mundo científico en el que menos se le ha negado este derecho y menos cuando ya ha alcanzado el status profesional de Rosalind.

Roser González Duarte

La Tierra

Y sus entrañas

De la Géologie à son Histoire. Bajo la dirección de Gabriel Gahou. CTHS; París, 1997. **Toward a History of Mineralogy, Petrology, and Geochemistry**. Dirigido por Bernhard Fritscher y Fergus Henderson. Institut für Geschichte der Naturwissenschaften; München, 1998. **Images of the Earth. Essays in the History of the Environmental Sciences**. Dirigido por L. J. Jordanova y Roy Porter. The British Society of the History of Science; Oxford, 1997.

Plinio el Viejo. Historia Natural. Libros I-VI. Introducción general de Guy Serbat. Editorial Gredos; Madrid, 1995-1998. **Restoro d'Arezzo. La Composizione del Mondo**. Edición preparada por Alberto Morino. Pietro Bembo-Ugo Guanda Editore; Parma, 1997.

Le Scienze della Terra nel Veneto dell'Ottocento. A cura di Ezio Vaccari. Istituto Veneto di Scienze, Lettere ed Arti; Venezia, 1998. **Lyell in America. Transatlantic Geology**, 1841-1853, por Leonard G. Wilson. The Johns Hopkins University Press; Baltimore, 1998. **Ferdinand A. Fouqué. Santorini and its Eruptions**. Edición preparada por Alexander R. McBirney. The Johns Hopkins University Press; Baltimore, 1998.

La geología, que estudia la estructura y dinámica de la tierra, abarca también su decurso histórico. Anuda esa plural consideración con el principio de las causas actuales, según el cual el presente encierra la clave del pasado. Dicho de otro modo, los mecanismos que operaron antaño no difieren de los que intervienen ahora. Hoy como ayer, la erosión, el transporte, la sedimentación, el metamorfismo, la erupción volcánica, el plegamiento y el levantamiento de montañas constituyen los mecanismos transformadores del relieve. Ese era el cuadro pergeñado en el segundo tercio del siglo XIX. Si dejamos de lado la teoría tectónica y otros avances, las grandes líneas del retablo permanecen.

Para llegar a esquema de tan diáfana simplicidad hubo que recorrer un largo camino, que arranca de las primeras descripciones del mundo, aunque el pensamiento se ahorma en rigor entre el último tercio del siglo XVIII y el primero de la centuria siguiente. De ahí que sea ese intervalo el foco principal de atención de tres obras generales, *De la Geólogie à son histoire*, *Toward a history of mineralogy, petrology, and geochemistry* e *Images of the Earth*. Se rinde en la primera homenaje al magisterio de François Ellenberger, historiador y geólogo de campo, padre de la metamorfosis alpina. A él debemos también la elucidación del eje pireneo-languedociano. *Images of the Earth* se reedita veinte años después, sin más cambios que la corrección de errores y la adición de un epílogo y un apéndice bibliográfico. Supuso en su momento un cambio de enfoque al sustituir las ideas geológicas por supuestos ideológicos con amplia concesión a la sociología de la ciencia. Un giro más firme se da, sin embargo, en *Toward a history of mineralogy, petrology, and geochemistry*, donde se agavillan las ponencias presentadas en un congreso celebrado en Munich en 1996.

El avance en el conocimiento de la naturaleza de los minerales arrastró consigo la geología. Más aún, de la fuente de aquélla bebe ésta, con todas sus consecuencias. Pero antes hubo que poner orden en el magma confuso de las "piedras", que designó durante siglos el mundo sólido, fósiles incluidos. Las primeras distinciones no llegaron hasta el siglo XVI.

Se vivía de Aristóteles y Plinio. De ambos tenemos meritorias traducciones en Gredos. Aunque incompleta todavía la *Historia Natural* del itálico,

los libros publicados bastan para adentrarse en los prolegómenos de la geología occidental. Plinio es, ante todo, un servidor del estado que termina por ocupar el almirantazgo de la flota del Tirreno. Escrita en torno al 77 d.C., la *Historia Natural* obedece a un plan general, muy laxo en su desarrollo, donde la asociación de ideas prima sobre el orden riguroso.

Parte del cosmos (libros I y II) para detenerse luego en la tierra y sus confines (III-VI). Conviene pasar a los libros XXXII-XXXVII, donde se ocupa del reino "mineral", si queremos entender el sentido pleno del libro segundo. Contiene éste una explicación pormenorizada de cuatro dominios que se corresponden con los cuatro elementos. Del ámbito del fuego analiza el mundo sideral y planetario. En el contexto del aire, los fenómenos atmosféricos, vientos y precipitaciones. De la tierra le importa la superficie, seísmos y fenómenos prodigiosos. Incluye aquí el estudio del océano, razón por la cual se ceñirá, por extenso, en el contexto del agua a las mareas. Reserva el apéndice para la medida de la tierra, que le sirve de introducción a los libros de geografía subsiguientes.

Restoro d'Arezzo recoge la elaboración árabe y escolástica de las enseñanzas plinianas en *Composizione del mondo*, terminada en 1282. A imagen del traspadano, se proponía ofrecer a la burguesía incipiente, que empezaba a olvidar el latín, una *summa* puesta al día de geografía, astronomía, astrología y, sobre todo, cosmología. Refleja el espíritu inquieto de la segunda mitad del siglo XIII, cuando se exalta que el hombre ha nacido para conocer las maravillas de este mundo.

"Demuestra" que el mar Mediterráneo nace del océano. "Explica" la formación ("generación") y erosión ("corrupción") de los montes por medio del agua que baja de las montañas arrastrando consigo piedras que terminan por elevar el valle y, por otro lado, abre hendiduras. El cielo ejerce su poder sobre la superficie terrestre y bajo la misma, donde provoca los terremotos. Por la mixtura que el cielo hace de los elementos se forman los minerales, rocas y metales, alumbre, azufre y sales. Es una lástima que esta edición crítica se limite a cuestiones filológicas de interés menor, sin entrar en la interpretación científica.

Darán un vuelco las cosas en el Renacimiento. En 1546 aparece *De natura fossilium* de Georg Bauer ("Agricola"), el primer manual de mineralogía. Distinguía allí entre fluidos y cuerpos minerales. Subdividía éstos en cuerpos homogéneos (minerales simples y compuestos por mezclas homogéneas de minerales simples) y mezclas heterogéneas de minerales simples. En otro orden, Bernard Palissy, alfarero, comienza a reconocer la naturaleza orgánica de los fósiles, con los que adornaba cuencos y vasijas.

En la centuria siguiente se acepta el concepto de homogeneidad física aplicado a los minerales y Giovanni Alfonso Borelli dota a la vulcanología de un esbozo de armazón científica. Se opuso a las "especulaciones filosóficas" de Aristóteles y Agrícola, según las cuales "vientos salidos del interior de la tierra" serían responsables del abrasamiento de los volcanes y provocarían los temblores de tierra. Observó la erupción del Etna e investigó los procesos de construcción y destrucción producidos, que describe en la *Historia et meteorologia incendii Aetnaei anni 1669*. Compara el movimiento de la colada de lava y el de un líquido en un sifón, aplicando los principios de la dinámica de fluidos.

La paleontología acelera el paso, a principios del XVIII, con el trabajo espléndido de J.J. Scheuchzer en *Piscium querelae et vindiciae* (1708), donde coteja la anatomía de un pez fósil del Terciario con el esqueleto óseo de su representante moderno. Por entonces se intuye que los minerales, además de cuerpos físicos, son compuestos químicos.

La geología británica posterior a 1730 veía en John Hutchinson su mentor. En *Moses's principia* afirmaba que Dios creó *ex nihilo* las partículas de masa inerte (destinadas a formar los cuerpos macroscópicos) y los átomos sutiles que comprenden los "cielos". Dedica *A treatise on mining* a la explicación de los estratos, sin olvidar las conchas que algunos esconden. Considera que en tiempos del diluvio la fuerza de la gravedad quedó suspendida y la tierra se disolvió en el agua.

Salamandra fósil de Ohningen. (J.J. Scheuchzer, Homo diluvii testis*, 1726)*

Así, paulatinamente, se va preparando el camino para la eclosión teórica de las postrimerías del siglo XVIII, cuando la geología emerge con fuerza, creadora de métodos propios y porosa a los empleados por la física y la química. Se plantea el origen de las rocas y las causas de su alteración. Se investiga la composición mineral; se estudia el comportamiento de minerales y rocas bajo distintas condiciones de presión; se ensayan los modos de solución y precipitación.

Dos teorías se enfrentan, la neptunista y la vulcanista. A juicio de la primera, capitaneada por Abraham Gottlob Werner, la acción de las aguas, en la construcción y demolición de masas rocosas, era, de largo, mayor que la de los volcanes. Habría en el principio un globo originario sumergido en un océano primordial, que fue desarrollándose por sedimentación de iniciales protorrocas. Los plutonistas, guiados por James Hutton, concedían un papel esencial al vulcanismo en el origen de las montañas y los estratos de la corteza. Pero Hutton rechazaba que el laboratorio pudiera convertirse en crisol donde dirimir de parte de quién estaba la razón, frente a otros que sí deseaban someter a prueba el origen de las rocas, fundiéndolas y ver qué ocurría cuando se enfriaba la lechada. Gregory Watt utilizó un horno de reverbero para calentar basalto amorfo.

Para completar el cuadro finisecular, Horace-Bénédict de Saussure. En su incesante trabajo de campo, debió de percibir muy pronto la necesidad de simplificar y normalizar las observaciones anotadas. Entre 1795 y 1797 redacta un breve manuscrito, que ha permanecido inédito. De cuatro páginas, lleva por título *Caractères lithologiques et géologiques*. Mediante letras, códigos y signos gráficos pergeña los tipos principales de rocas y minerales, su textura y color, espesor, situación, orientación e inclinación de los depósitos, altura de los afloramientos y de las montañas. En una palabra, asocia estratigrafía, estructura y geomorfología regional.

Saussure comenzó neptunista. Incluyó granitos y gneiss entre las rocas primitivas estratificadas, depositadas en un océano originario. A estos depósitos le seguían sedimentos de transición y, luego, sedimentos secundarios y terciarios cuando las aguas oceánicas se enfriaron y su nivel descendió. Pero la disposición de los granitos y los gneiss en el macizo del Mont-Blanc, junto con ulteriores observaciones de pliegues complicados y horizontes calcáreos, le inducen, en 1786, a proclamar que las cadenas montañosas resultan de la acción de fuerzas violentas exteriores que han actuado por compresión horizontal.

Desde la Bergakademie de Friburgo Werner dictaba los postulados de la *geognosia*, ciencia que entendía de las relaciones estructurales entre masas rocosas, haciendo abstracción de los organismos fósiles incluidos. Distinguía en su *Orictognosia* cinco clases de rocas. Las más viejas, las Primitivas o Primarias, eran rocas cristalinas, como el granito, hallado en los núcleos de las montañas. Venían luego las rocas de Transición, estratificadas y, en ocasiones, cristalinas. Por encima se instalaban las rocas estratificadas Secundarias, seguidas de rocas Volcánicas y los depósitos Aluviales.

Los fósiles se reputaban todavía meros "archivos de la naturaleza", sin ninguna correspondencia con la estratigrafía. Se describían e ilustraban sin detallar el tipo de roca matriz. Pero ya en 1796 William Smith comprueba que podía elencar los distintos suelos en razón de los fósiles "característicos" del lecho. En 1801 publicó un esbozo del "orden natural de los diversos estratos" y sus afloramientos. Más tarde, Alexandre Brongniart y Georges Cuvier redactan un mapa geognóstico apoyado en los fósiles distintivos, según el ejemplo de Smith.

Con ese telón de fondo se desarrolla el viaje europeo de William Buckland en 1816. Le sirvió para agregar a su *Orden de superposición de estratos de las Islas Británicas*, un nuevo mapa del orden de sucesión del Secundario o "Formaciones Floetz", como le explicó Werner en Friburgo.

En un orden complementario, el descubrimiento, ese mismo año, del isomorfismo químico por Eilhard Mitscherlich y, en 1822, del polimorfismo parecían poner en cuestión las ideas sobre estructura cristalina avanzada por René Just Haüy, que habían dominado la ciencia de la mineralogía durante los últimos decenios del siglo XVIII. Los nuevos conceptos descansaban en la hipótesis de la formación de microcristales específicos de cada substancia química.

La influencia de Werner en la geología italiana constituye motivo central de *Le Scienze della Terra nel Veneto dell'Ottocento.* Pero la ciencia véneta, que encuentra en Giovanni Arduino un precedente patrio de primera magnitud, no sólo vive de Friburgo, a donde ha acudido, por ejemplo, Napione. La sombra de la paleontología francesa guía la interpretación del pasado.

Giambattista Brocchi se adhiere al wernerismo más intransigente en la *Memoria mineralogica sopra la Valle di Fassa in Tirolo*, publicada en 1811, duramente contestada por Scipione Breislak, autor de una plutonista *Introduzione alla geologia*. Para conocer las razones esgrimidas por los vulcanistas emprende un viaje explorador por Italia. Va apuntando un rosario creciente de notas sobre la progresiva emersión de la península.

En el trayecto de Siena a Roma contempla lechos de lava y escorias metálicas de la fusión, pruebas inconfundibles de vulcanismo. Su transformación mental es lenta. Mientras el basalto parecía tener un origen volcánico inmediato, otras rocas podrían haberse constituido por un mecanismo distinto. La extensión y espesor de las cenizas de Pompeya y Herculano ahondan sus dudas neptunistas, pero es todavía el suyo un vulcanismo inserto en una geología dominada por fuerzas sedimentarias. No se atrevió a abandonar la idea de un planeta sumergido donde la precipitación química fuera el agente litogénico principal, pero al refinar la idea de los volcanes submarinos reconocía a los agentes ígneos una importancia mayor.

Tommaso Antonio Catullo, docente desde 1829 de mineralogía, geología y zoología en la Universidad de Padua, se había dado a conocer con un trabajo escolar sobre determinación de la edad relativa de las rocas a través de los restos fósiles en *Memoria seconda sull'arenaria verde e grigia del bellunese, colla indicazione dei fossili che in essa si trovano* (1816). Aplica a las rocas del Véneto —y del Mesozoico de Italia— el método paleontológico, que caracteriza la cronología de un estrato por los fósiles típicos. En esa línea prosigue con *Zoologia fossile delle province venete*, apoyándose en Brongniart. Privilegiaba la información fósil en caso de conflicto de datación con información geognóstica (morfología, naturaleza de las rocas, potencia de los suelos, dirección y posición de los estratos). Cabía que, en tales casos, los caracteres geognósticos procedieran de una *formación instantánea*. Las especies, por contra, son más estables en el tiempo.

Esfuerzos de esa índole se repetían con escolar mimetismo en España y en otros países. Hasta que los concep-

tos fundamentales reciben una nueva interpretación, radical, luminosa, en el marco teórico original que aportan los *Principles of Geology* (1830-33), del escocés Charles Lyell. Según su tesis central, los cambios operados en la superficie se produjeron por procesos lentos e imperceptibles, los mismos que todavía persistían. La lluvia y los ríos erosionaron los suelos y las olas barrieron las líneas de costa. William Whewell acuñó el término *uniformitarismo* para designar el ritmo del cambio ideado por Lyell y el de *catastrofismo* para el punto de vista opuesto, sostenido entonces por la mayoría de los geólogos. Para los catastrofistas, los estratos rocosos abruptamente inclinados, verticales e incluso doblados que se observaban en las montañas remitían a violentas convulsiones de la superficie.

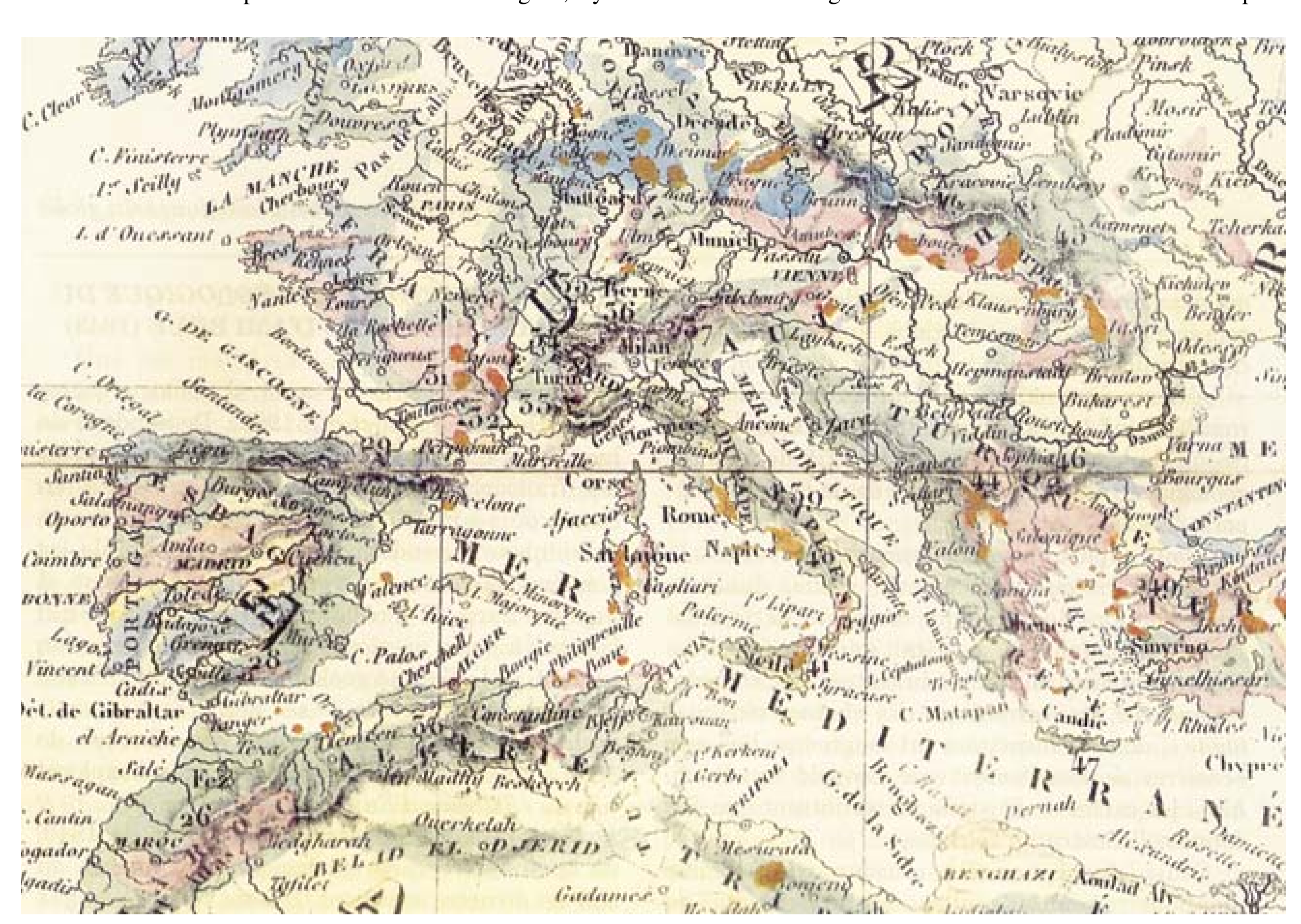
La influencia de los *Principles* trascendió los muros de la geología. El cambio gradual de Lyell implicaba entornos bastante estables. Las modificaciones locales en geografía y clima contribuyeron a la extinción continua de las especies. Procedía ésta con parsimonia y nuevas especies, por lo común estrechamente emparentadas con las precedentes, sustituían a las extintas.

En 1841 aceptó la invitación de la Institución Lowell de Boston para dar un ciclo de conferencias. Leonard Wilson recrea ese y otros viajes en *Lyell in America*, que es también una documentada historia de la disciplina, y su excelente nivel, en ese país. Lyell esperaba que la vasta escala del continente —sus cadenas montañosas, sus llanuras, los Grandes Lagos y los ríos— confirmara la tesis uniformitarista.

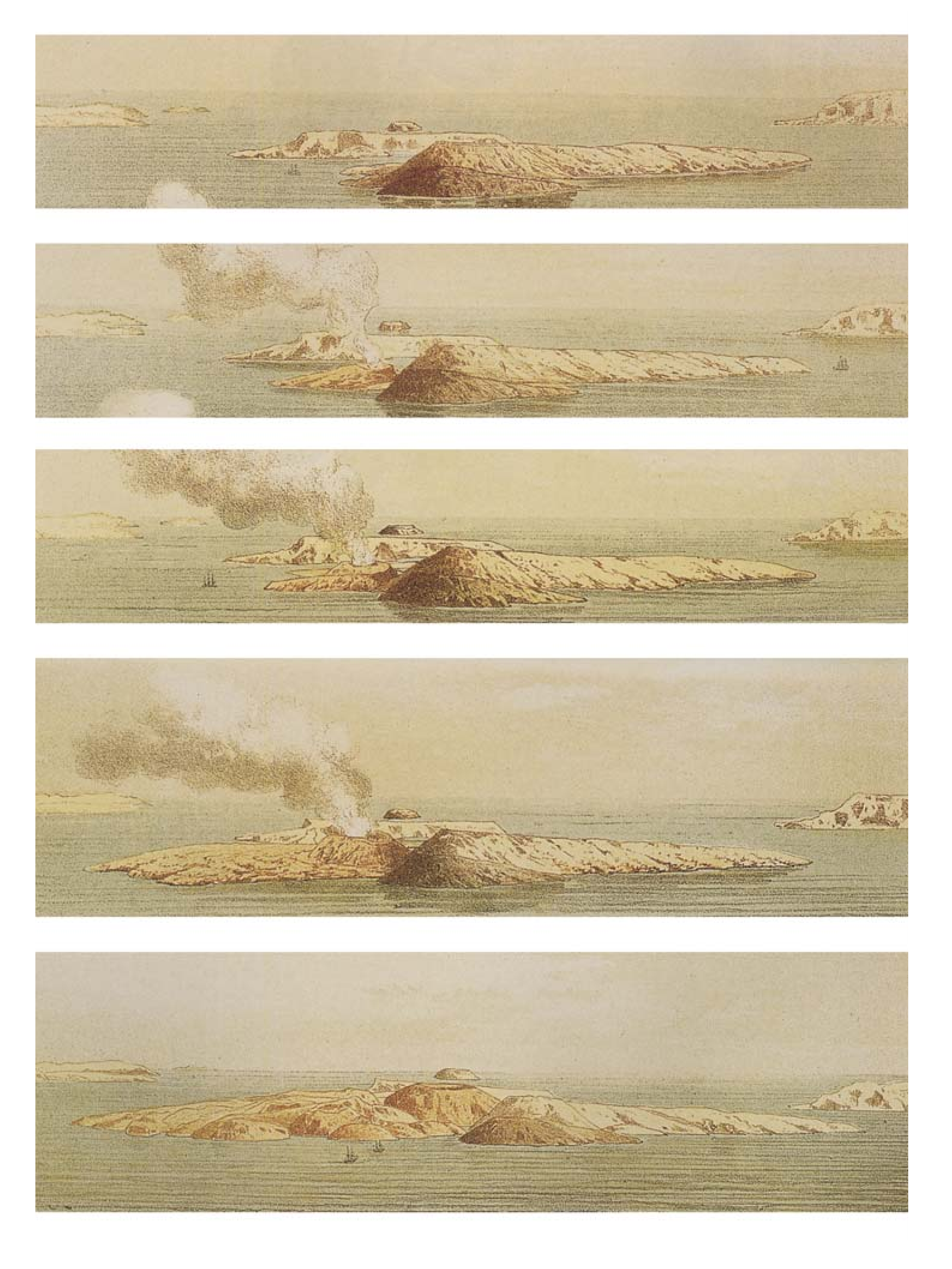
La geología americana que encuentra Lyell había estudiado el Silúrico, Devónico y Carbonífero de Nueva York y Pennsylvania. Lardner Vanuxem había señalado que los estratos horizontales de los Apalaches septentrionales se hundían allende Pennsylvania y eran, por tanto, anteriores a ella. Timothy Abbot Conrad puso en correspondencia los fósiles de los estratos de Nueva York con el Silúrico de Inglaterra. En su excursión al Niágara, Lyell se detuvo en el lago Ontario, donde indicó la línea de costa de un lago proglacial y recordó a los eskers suecos (antiguos cursos fluviales glaciales). Demostró que las cataratas habían estado antes en el escarpe del Niágara en Queenston y habían retrocedido con los años río arriba. Calculó que la recesión se había producido a un ritmo de unos 30 centímetros al año; las cataratas tenían, pues, unos 35.000 años de antigüedad.

En su visita a Pennsylvania oriental le acompañó Henry Darwin Rogers, quien con su hermano William Barton Rogers habían resuelto la estructura de los Apalaches, determinando que constaban de una serie de sierras paralelas, con un solo pliegue cada una. El descubrimiento de tales pliegues planteaba la cuestión sobre la formación de la cordillera y las fuerzas que habían provocado su elevación, "una gran presión lateral" a juicio de Lyell.

Los árboles fósiles de los acantilados de Joggins le ofrecieron la prueba contundente de que los horizontes de carbón se habían formado a par-



Extracto del mapa del Globo de Ami Boué (1843. Escala, 1/58.000.000). Por convención, en rosa aparecen las zonas de esquistos cristalinos y granitos; en azul, suelos del Primario; en verde, terrenos del Secundario; en amarillo, del Terciario; en blanco, del Cuaternario, y, anaranjadas, las zonas volcánicas



Láminas XXV y XXVI del libro "Santorin et ses eruptions" de F. Fouqué. Recoge una secuencia de vistas de Kamenis tomadas desde Thira. De arriba abajo: antes de la erupción de 1866, marzo de 1866, mayo de 1866, febrero de 1867 y después de la erupción

tir de la acumulación de vegetación de bosques. Sobre esas cuestiones seguirá reflexionando a su vuelta a Londres, una vez abra las treinta y seis cajas de fósiles que había traído de América.

Mediado el siglo la química se ha convertido en herramienta imprescindible de la geología, a la vez que ésta se abre a una arqueología científica emergente. Ninguna obra simboliza mejor esa situación que la de Ferdinand André Fouqué, ahora vertida al inglés: *Santorini and its Eruptions*, donde sustituye la teoría de los cráteres de elevación por la interpretación moderna de las calderas.

Con una sólida formación y una breve experiencia empresarial, inicia en 1861 una serie de viajes a distintos volcanes. Ese mismo año aborda, con Charles Sainte-Claire, las relaciones geológicas y químicas de los gases y fumarolas volcánicas del Vesubio. En 1865, sube por dos veces al Etna para observar las erupciones, entonces vivas. Vuelve al Vesubio. En 1866 parte hacia Santorini, que había entrado en fase eruptiva. Viaja a las Azores en 1867 y 1868.

La teoría de los cráteres de elevación había sido formulada por L. von Buch en 1818. Muy pronto surgió otra explicación rival, la teoría del colapso o cráter de hundimiento. El debate se prolongó a través de la influyente obra de Elie de Béaumont y Dufresnoy, quienes aportaron razonado respaldo a la tesis de Buch. En 1868, Fouqué señalaba que la verticalidad de los acantilados de la bahía de Santorini no podía originarse por explosiones. Von Fritsch insistió en que Santorini era un cráter de violentísima explosión ligeramente modificado por la erosión y leves episodios de desplome provocados por fusión interna del volcán. Por fin, en 1879, Fouqué argumentaba, tras un minucioso trabajo de campo, que el levantamiento no importó en exceso y que la explosión, por sí sola, no justificaba el volumen perdido del volcán. Apelando a la escasa proporción de escoria en la piedra pómez en relación con el volumen de roca que había desaparecido, la evacuación de una gran cantidad de magma, infería, había minado la estabilidad del volcán. De haberse producido esa inmensa depresión únicamente por la explosión, el volumen de rocas viejas entre lo arrojado sería equivalente al de la caldera. Y no era ese el caso. Por consiguiente, el "hundimiento, precedido, acompañado y seguido por explosiones", podía dar cuenta del empinamiento de las paredes, del tamaño de la cavidad y de la escasez de rocas antiguas entre lo arrojado.

La construcción del Canal de Suez necesitaba grandes cantidades de piedra pómez para la obra de cementación. Durante los trabajos de cantería en la isla de Therasia aparecieron estructuras prehistóricas enterradas bajo las cenizas. Fouqué prosiguió por su propia cuenta las excavaciones. Y en un lugar cercano a Akrotiri descubrió edificios y artefactos que reflejaban las condiciones de la isla antes de la erupción. Mediante la combinación de pruebas arqueológicas y geológicas, llegó a la conclusión de que la erupción se había producido entre el año 2000 y el 1300 a.C. (Las técnicas modernas sitúan la fecha entre el 1628 y el 1645 a.C.) Acertó a integrar el microscopio petrográfico para determinar las composiciones minerales y fuentes posibles de la cerámica. En 1939, Spyridon Marinatos declaraba que la erupción de Santorini había barrido, tapado mejor, la civilización minoica de Creta.

LUIS ALONSO

Caos

filosófico

EXPLAINING CHAOS, por Peter Smith. Cambridge University Press; 1998.

"El caos, en el sentido que aquí nos interesa, es esencialmente un concepto matemático." Buen comienzo; en otros libros divulgativos sobre un tema de moda, se topa uno con exageraciones sensacionalistas antes que con el rigor. El objetivo es presentar los conceptos básicos para entender en qué consiste la teoría del caos, y exponer las nuevas ideas que ésta ha aportado a la filosofía de la ciencia.

El tratamiento de los elementos de la teoría del caos que ofrece el autor es muy completo. Los conceptos de atractor, no linealidad, sensibilidad a las condiciones iniciales o dimensión fractal se van desgranando en los primeros capítulos. Pero no de modo descarnado; para exponerlos de modo casi intuitivo, se recurre al modelo de Lorenz y a otros ejemplos. Aparte de la noción de derivada, poco más bagaje matemático se requiere para seguir el hilo.

Aparecen luego —explicadas con la misma sencillez— las "rutas al caos": las explosiones homoclínicas, el desdoblamiento de período y la intermitencia. Resulta gratificante comprobar el exquisito cuidado en la elección del vocablo adecuado y en simplificar el lenguaje hasta donde es posible. Los procedimientos para obtener una sección de Poincaré o para embutir un atractor se presentan de manera tan natural, que pierden todo lo que podrían tener de abstrusos. El resultado final es una visión de conjunto sin complicaciones innecesarias.

A lo largo del libro se alternan los pasajes matemáticos con los de corte más filosófico. Así, a la vez que se presenta el modelo de Lorenz, se considera hasta qué punto es válida una teoría, y en particular un sistema simplificado a ultranza, para describir la realidad. Más adelante, se debate lo que significa "acercarse a la verdad".

¿Por qué, se pregunta el autor, esta especie de mistificación de la teoría del caos? Según él, nada sustancial añade a la filosofía de la ciencia: ni un método nuevo, ni una aproximación diferente de la comprensión de la naturaleza. Simplemente, afirma, las dudas y las vacilaciones que se aprecian en esta teoría, esa indeterminación latente en muchos aspectos, se debe a que está elaborándose, aún sin acabar. (Los dos últimos capítulos, en los que se trata de la definición de azar y de caos, son buena muestra de ello.) Pues bien: precisamente por eso encuentra fascinante esta nueva disciplina. En la página del manual donde ha quedado plasmada una fórmula, no se aprecia todo el proceso intelectual que permitió llegar a ella. En cambio, con el caos estamos contemplando cómo se fragua una teoría nueva; y es apasionante comprender el proceso.

ANGEL GARCIMARTÍN

R. Michael Garavito

La aspirina

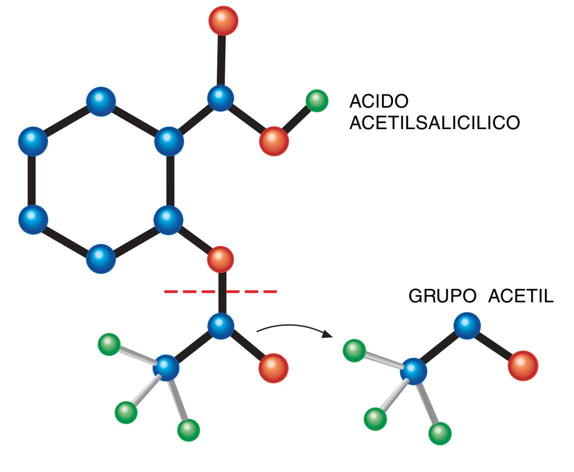
ACTIVIDAD ENZIMATICA
ACIDO ARAQUIDONICO
PROSTAGLANDINA H_2
SUBUNIDAD DE ENZIMA PGHS
RETICULO ENDOPLASMATICO

La aspirina fue inventada en los años noventa del siglo XIX por el químico alemán Felix Hoffmann, en su empeño por aliviar a su padre de los dolores de la artritis. En los cien años transcurridos desde entonces, la aspirina (ácido acetilsalicílico) se ha convertido en el fármaco más empleado en todo el mundo. Pero hasta hace poco, se desconocía su mecanismo de acción.

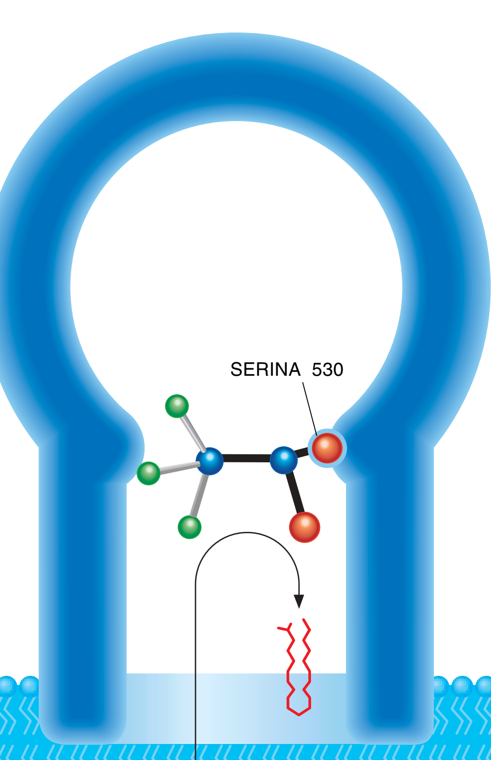
En los años setenta se comprobó que las lesiones hísticas desencadenaban la liberación de prostaglandinas, moléculas de tipo hormonal que causan fiebre e inflamación. Se descubrió también que la aspirina bloqueaba la producción de esas moléculas. Para desentrañar la razón de ello, varios investigadores, incluido quien esto escribe, nos aprestamos a analizar la enzima productora de las prostaglandinas, o sea, la sintasa prostaglandina H_2, o PGHS.

Mediante cristalografía de rayos X analizamos la molécula. Hallamos que PGHS constaba de dos subunidades proteínicas, cada una con un largo canal interior. Por éstos penetran moléculas de ácido araquidónico (un ácido graso esencial) que sufren una transformación química en el interior de la enzima, convirtiéndose en moléculas de prostaglandina H_2. La aspirina impide esa conversión cerrando los canales: el grupo acetil de la aspirina se enlaza a determinado lugar del interior del canal, bloqueando el paso al ácido araquidónico. El ibuprofén y el naproxén, otros medicamentos antiinflamatorios, taponan físicamente los canales de la enzima, en vez de alterar su química.

1. LA ENZIMA PGHS produce las prostaglandinas que causan la fiebre y la inflamación. El ácido araquidónico procedente del retículo endoplasmático, una membrana celular interna, se desplaza por un canal hacia el interior de la enzima, donde se convierte en prostaglandina H_2.



2. LA MOLECULA DE ASPIRINA contiene un grupo acetil enlazado con el ácido salicílico; incluye átomos de carbono (●), oxígeno (●) e hidrógeno (●). Cuando la aspirina penetra en el canal interno de la enzima PGHS, la molécula se divide en dos, quedándose el grupo acetil adherido a un punto interior del canal mientras el ácido salicílico habitualmente sigue su camino.



3. LA NUEVA CONFIGURACION de la enzima PGHS (con el grupo acetil enlazado a la serina 530) bloquea al ácido araquidónico procedente del núcleo de la enzima, evitando así su conversión en prostaglandina H_2. Por desgracia, la aspirina cierra todas las formas de la enzima PGHS, incluida la protectora del revestimiento gástrico. Las empresas farmacéuticas andan en busca de una nueva clase de analgésicos que ataquen sólo a la expresión de la enzima PGHS que provoca inflamaciones.

Seguiremos explorando los campos del conocimiento



EL MAPA DEL UNIVERSO, por Stephen D. Landy

Los astrónomos están estudiando con técnicas prestadas del análisis musical, la formación de agrupaciones galácticas de tamaño creciente.

PREVENCION DE CATASTROFES VOLCANICAS, por Vicente Araña

La volcanología tiene como objetivo principal la mitigación de las catástrofes. Su progreso se basa en un mejor conocimiento de los procesos eruptivos y en la eficaz detección de fenómenos precursores.

CIRUGIA GUIADA POR IMAGENES, por W. Eric L. Grimson, Ron Kikinis, Ferenc A. Jolesz y Peter McL. Black

La técnica de la realidad virtual ofrece al cirujano medios equivalentes a la visión por rayos X, lo que le permite extirpar los tumores sin dañar los tejidos más delicados.

GUERRA BIOLOGICA CONTRA LAS COSECHAS, por Paul Rogers, Simon Whitby y Malcolm Dando

El arsenal biológico no se limita al ántrax o las plagas. Otros organismos pueden convertirse en letales contra las cosechas de las que depende el hombre.

GÖDEL Y LOS LIMITES DE LA LOGICA, por John W. Dawson, Jr.

Kurt Gödel, genio matemático, se consagró en su obra a la racionalidad, pero hubo de luchar con ella en su intimidad.

HIPERBUSQUEDA EN LA RED, Proyecto *Clever*

La velocidad con que aumenta el caudal de información disponible en el ciberespacio es vertiginosa y la necesidad de buscadores más eficaces, apremiante. Una técnica nueva analiza la concatenación de las páginas de la Telaraña.

EN BUSCA DEL MURCIELAGO FANTASMA, por Glenn Zorpette

En ríos de la selva de Belize, dos zoólogos captan los gritos ultrasónicos de los quirópteros y capturan un murciélago enorme.

EL SECRETO DE NABADA, por Joachim Bretschneider

Durante décadas los orientalistas han creído que las colinas de ruinas del norte de Siria eran de importancia secundaria en comparación con los yacimientos del Irak. Las excavaciones de Tell Beydar han traído una sorpresa: la metrópoli de Nabada.

